Plans d'expériences

Manuel d'utilisation

du logiciel Minitab

(VERSION 16)

Jacques GOUPY

24, avenue Perrichont
75016 Paris

jacques@goupy.com

Sommaire

1. Ouverture de Minitab 4
   - 1.1 Démarrage 4
   - 1.2 Accès aux plans d'expériences 4

2. Définir le plan d'expériences 5
   - 2.1 Définition globale 5
   - 2.2 Définition des facteurs 8
   - 2.3 Définition des options 9
   - 2.4 Définition des sorties souhaitées 9

3. Exemple 01_ma_voiture 10
   - 3.1 Présentation de l'exemple 10
   - 3.2 Construction du plan d'expériences 10
   - 3.3 Analyse mathématique de l'exemple 01_mavoiture 13
   - 3.4 Interprétation de l'analyse du plan et conclusion 17

4. Exemple 02_bijoux 17
   - 4.1 Présentation de l'exemple 17
   - 4.2 Construction du plan d'expériences 18
   - 4.3 Analyse du plan d'expériences 19
   - 4.4 Interprétation de l'analyse du plan et conclusion 21

5. Exemple 03_Galette des rois 22
   - 5.1 Présentation de l'exemple 22
   - 5.2 Construction du plan d'expériences 23
   - 5.3 Analyse du plan d'expériences 23
   - 5.4 L'optimiseur de Minitab 25
   - 5.5 Interprétation de l'analyse du plan et conclusion 26

6. Exemple 06_Sulfonation 28
   - 6.1 Présentation de l'exemple 28
   - 6.2 Construction du plan d'expériences 29
   - 6.3 Analyse du plan d'expériences 31
   - 6.4 Interprétation de l'analyse du plan et conclusion 34

7. Exemple 12_Rectification 35
   - 7.1 Présentation de l'exemple 35
   - 7.2 Construction du plan factoriel 36
   - 7.3 Analyse du plan factoriel 36
   - 7.4 Construction du plan pour surface de réponse 37

7.5 Analyse du plan pour surface de réponse 39
7.6 Interprétation de l'analyse du plan 41

8. Exemple 13_Yoghourt 44
8.1 Présentation de l'exemple 44
8.2 Construction du plan de Box-Behnken 45
8.3 Analyse du plan de Box-Behnken 46
8.4 Interprétation de l'analyse du plan 47

Bibliographie 50

Plans d'expériences

Manuel d'utilisation du logiciel Minitab (Version 16)

(JACQUES GOUPY)

Le logiciel Minitab est un logiciel de statistiques dans lequel une partie est consacrée aux plans d'expériences. Le présent manuel ne traite que la partie des plans d'expériences. La version 16 existe en plusieurs langues : anglais, français, etc.

1. OUVERTURE DE MINITAB

1.1 DEMARRAGE

Pour ouvrir Minitab suivez les instructions suivantes :

Double-cliquez sur l'icône Minitab (Figure .1)

Figure .1 - Icône Minitab

On obtient la fenêtre d'accueil de Minitab (Figure .2) constituée :

- de la barre des menus
  Il y a 11 titres de menus : Fichier, Edition, Données, Calc, Stat, Graphique, Editeur, Outils, Fenêtre, Aide et Assistant.
- de la barre des icônes
  Plusieurs icônes sont affichées dans cette barre et elles donnent accès aux fonctions les plus utilisées. Il est possible de réaménager cette barre en fonction de ses propres besoins.
- d'une fenêtre "Session"
  Cette fenêtre indique la date et l'heure de début de session. Elle enregistre ensuite toutes vos commandes et tous vos résultats.
- d'une Feuille de travail analogue à celle du tableur Excel.

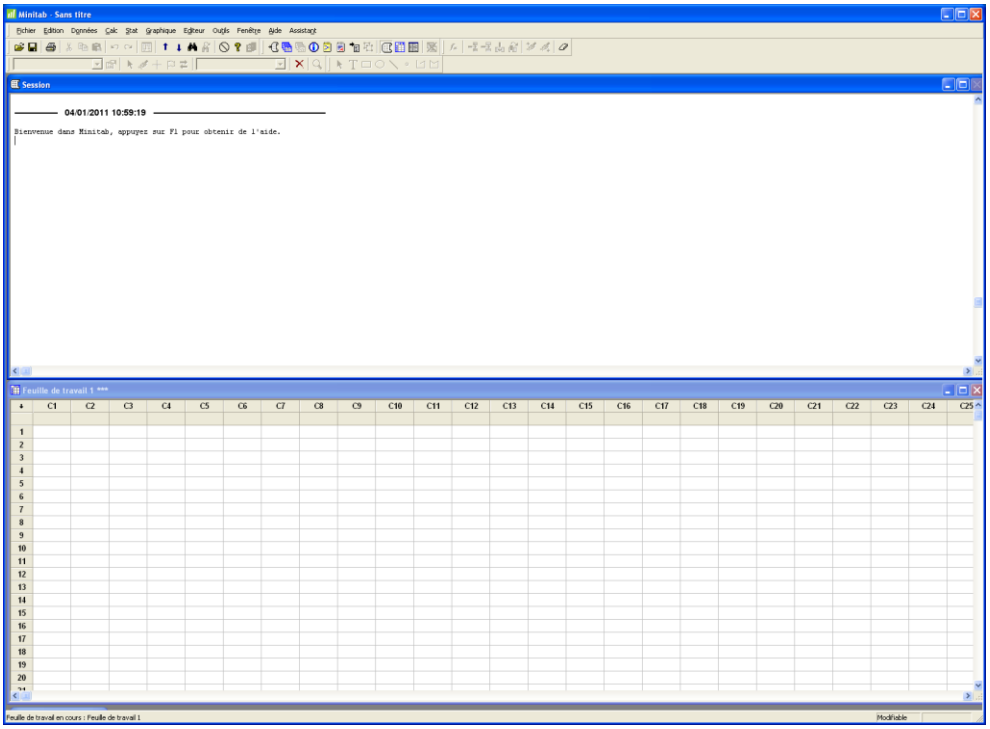


Figure .2 - Fenêtre d'accueil de Minitab

1.2 ACCES AUX PLANS D'EXPERIENCES

On accède aux plans d'expériences de la manière suivante :

☞ Cliquez sur Stat du menu principal. Un menu déroulant apparaît dans lequel figure DOE (Plan d'expériences).

☞ Cliquez sur DOE (Plan d'expériences). Un nouveau menu apparaît (Figure 3) dans lequel il y a quatre choix :

- Plan factoriel
- Surface de réponse
- Mélange
- Taguchi

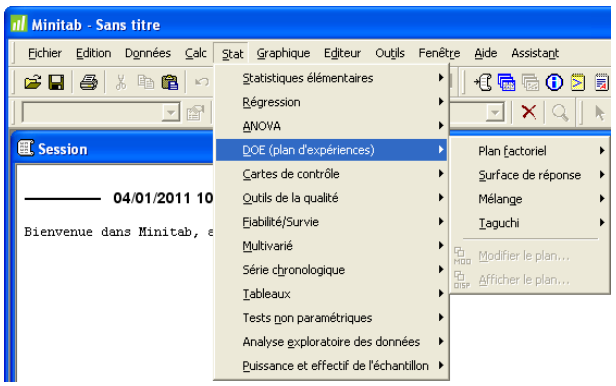


Figure 3 – Menus donnant accès aux plans d'expériences.

2. DEFINIR LE PLAN D'EXPERIENCES

2.1 DEFINITION GLOBALE

Pour tous les plans, il faut définir les réponses, les facteurs, les niveaux. Les modalités d'introduction de ces données sont pratiquement les mêmes pour tous les plans. Selon les spécificités de chaque plan, il faudra également indiquer les contraintes, les aliases, les blockings, etc. avant de demander la construction du plan adapté à l'étude. .

La description de l'entrée des données est faite sur les plans factoriels. Pour les autres types de plans, on retrouve les mêmes éléments avec de légères variantes qui seront signalées lors de la description des exemples.

☞ Cliquez sur la rubrique Plan factoriel. Apparaît un menu dans lequel, seul pour le moment, la création d'un plan factoriel est possible (Figure 4).

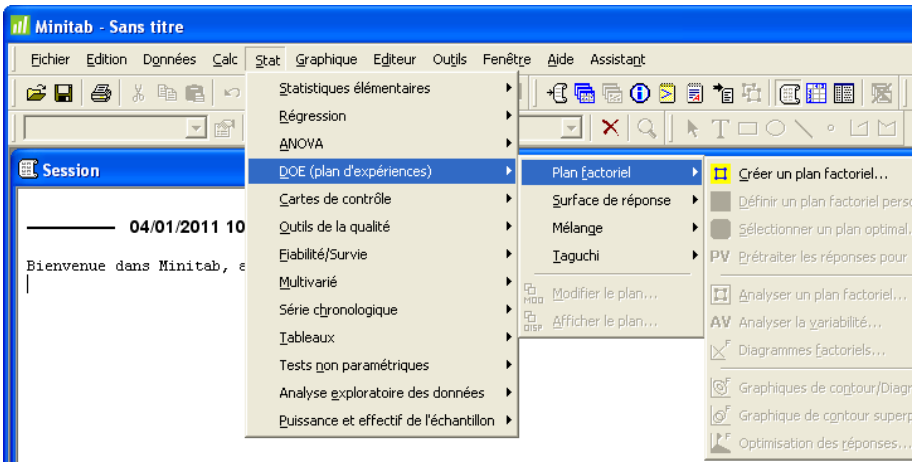


Figure 4 – Menu permettant de créer un plan factoriel.

☞ Cliquez sur Créer un plan factoriel. Apparaît une fenêtre dans laquelle un choix de plans vous est proposé (Figure 5).

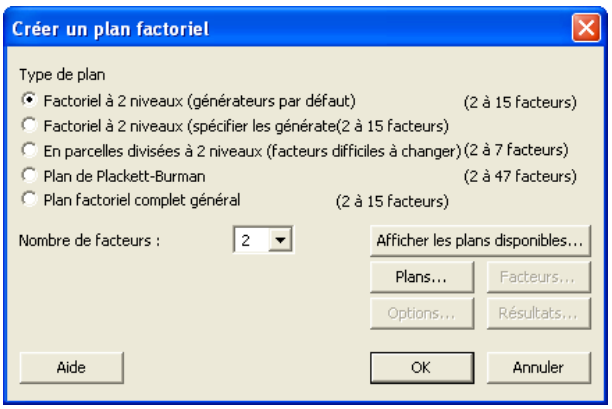

Créer un plan factoriel
Type de plan
Factoriel à 2 niveaux (générateurs par défaut) (2 à 15 facteurs)
Factoriel à 2 niveaux (spécifier les générate(2 à 15 facteurs)
En parcelles divisées à 2 niveaux (facteurs difficiles à changer) (2 à 7 facteurs)
Plan de Plackett-Burman (2 à 47 facteurs)
Plan factoriel complet général (2 à 15 facteurs)
Nombre de facteurs : 2
Afficher les plans disponibles...
Plans...
Facteurs...
Options...
Résultats...
Aide
OK
Annuler

Figure 5 – Fenêtre proposant plusieurs types de plans d'expériences.

Cette fenêtre propose plusieurs possibilités :

• Le type de plan

Cette rubrique vous demande d'indiquer le plan que vous désirez construire :

– Plan factoriel à 2 niveaux (générateurs par défaut)

Permet de construire un plan factoriel complet ou fractionnaire ayant de 2 à 15 facteurs. Les générateurs d'aliases sont imposés par le logiciel.

– Plan factoriel à 2 niveaux (spécifier les générateurs)

Permet de construire un plan factoriel fractionnaire ayant de 2 à 15 facteurs. Les générateurs d'aliases peuvent alors être choisis par l'expérimentateur.

– Plan en parcelles divisées à 2 niveaux (facteurs difficiles à changer)

Permet de construire un plan parcelles divisées plus connu sous le nom de Split Spot ayant de 2 à 7 facteurs.

– Plan de Plackett et Burman.

Permet de construire un plan de Plackett et Burman ayant de 2 à 47 facteurs.

– Plan factoriel complet.

Permet de construire un plan factoriel complet ayant de 2 à 15 facteurs et dont les niveaux sont compris entre 2 et 100 niveaux.

• Les plans disponibles

C'est une rubrique d'information. Si vous cliquez sur le bouton Afficher les plans disponibles vous obtenez la Figure 6 qui vous donne tous les plans possibles avec leur résolution. Si vous sélectionnez En parcelles divisées à 2 niveaux vous obtenez une autre fenêtre de renseignements. Enfin, si vous cliquez sur Plan factoriel complet général vous n'aurez aucun renseignement car il y a trop de cas possibles en fonction du nombre de niveaux.

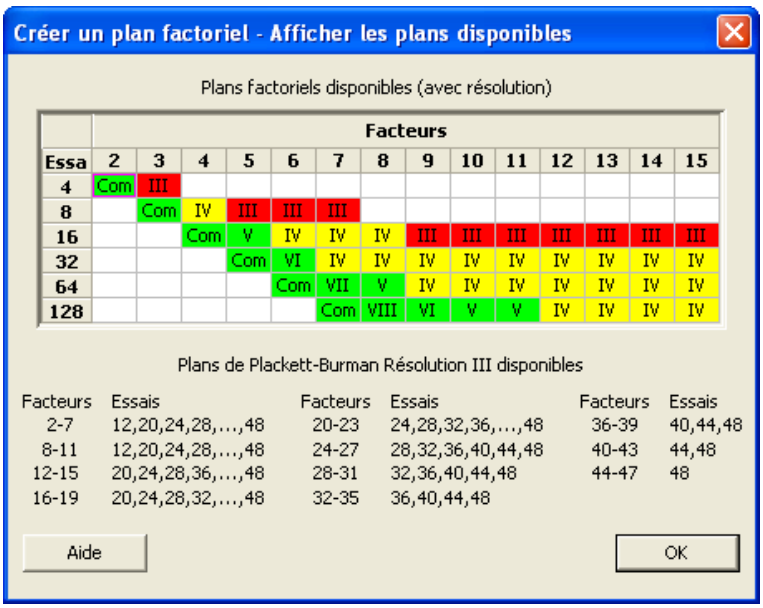

Créer un plan factoriel - Afficher les plans disponibles
Plans factoriels disponibles (avec résolution)
Facteurs
Essa 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
4 Com III
8 Com IV III III III
16 Com V IV IV IV III III III III III III III
32 Com VI IV IV IV IV IV IV IV IV IV IV
64 Com VII V IV IV IV IV IV IV IV IV
128 Com VIII VI V V IV IV IV IV
Plans de Plackett-Burman Résolution III disponibles
Facteurs Essais Facteurs Essais Facteurs Essais
2-7 12,20,24,28,...,48 20-23 24,28,32,36,...,48 36-39 40,44,48
8-11 12,20,24,28,...,48 24-27 28,32,36,40,44,48 40-43 44,48
12-15 20,24,28,36,...,48 28-31 32,36,40,44,48 44-47 48
16-19 20,24,28,32,...,48 32-35 36,40,44,48
Aide
OK

Figure 6 – Fenêtre proposant plusieurs types de plans d'expériences factoriels complets ou fractionnaires.

• Le nombre de facteurs

Cette rubrique vous demande d'indiquer le nombre de facteurs du plan. Il faut remplir cette case avant de solliciter le bouton Plans. Pour vous entrainer mettez par exemple 6 et

☞ Cliquez sur le bouton Plans

Avec 6 facteurs on obtient la Figure 7. Vous avez le choix entre 4 plans différents. Selon votre étude vous choisirez un 2^6 à 64 essais, un 2^{6-1} à 32 essais, un 2^{6-2} à 16 essais ou un 2^{6-3} à 8 essais.

Vous pouvez encore ajouter des points au centre, faire des répétitions aux sommets du domaine et choisir le nombre de blocs.

☞ Cliquez sur le bouton OK quand vous avez terminé votre choix.

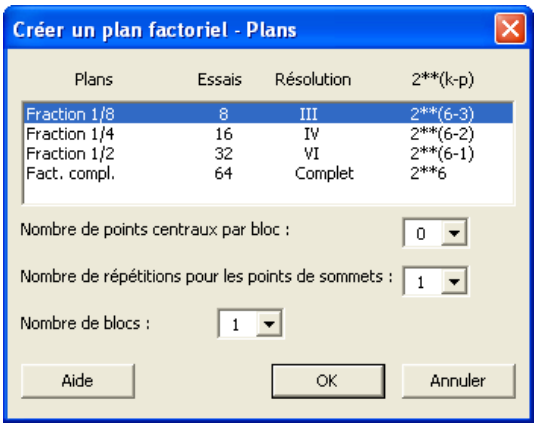


Figure 7 – Fenêtre permettant de choisir un plan d'expériences factoriel complet ou fractionnaire.

Vous revenez alors la fenêtre Créer un plan factoriel (Figure 5) dans laquelle les trois boutons précédemment grisés sont maintenant accessibles : Facteurs, Options, Résultats.

2.2 DEFINITION DES FACTEURS

☞ Cliquez sur le bouton Facteurs, vous obtenez la Figure 8 dans laquelle figurent les 6 facteurs avec leur nom, leur type, et leurs niveaux.

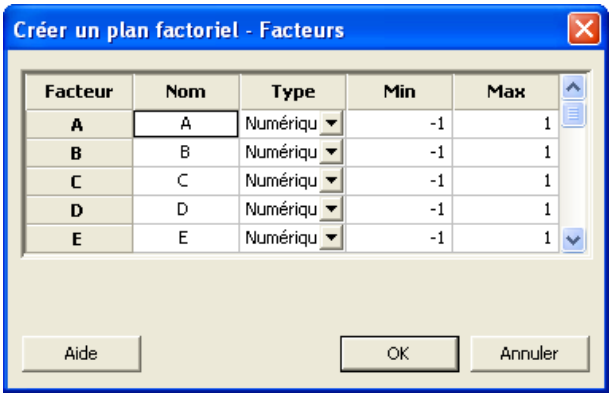


Figure 8 - Fenêtre permettant de définir les caractéristiques des facteurs.

Vous pouvez modifier les noms des facteurs pour les adapter à votre étude. Vous pouvez aussi modifier le type des facteurs : numérique ou texte. Vous pouvez également modifier la valeur des niveaux.

2.3 DEFINITION DES OPTIONS

☞ Cliquez sur le bouton Options, vous obtenez la fenêtre de la Figure 9 dans laquelle vous pouvez encore modeler votre plan. Vous pouvez le replier ou non. Vous pouvez randomiser ou non les essais. Vous pouvez demander que les résultats de l'analyse soient stockés dans la feuille de travail.

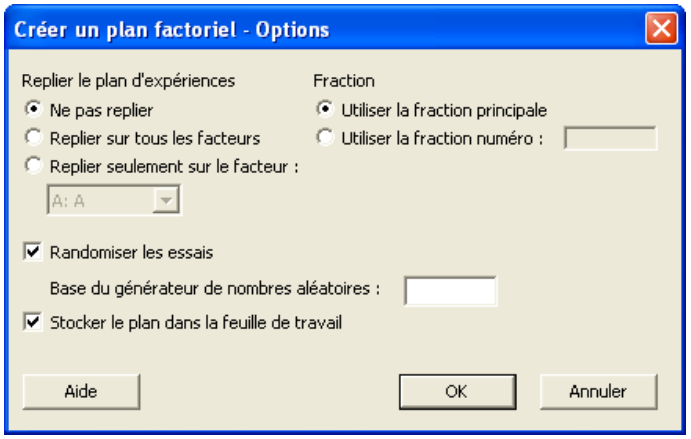


Figure 9 - Fenêtre permettant de préciser les caractéristiques du plan d'expériences.

2.4 DEFINITION DES SORTIES SOUHAITEES

☞ Cliquez sur le bouton Résultats, vous obtenez la fenêtre de la Figure 10 dans laquelle vous avez le choix des sorties : Tableau récapitulatif; Tableau récapitulatif et tableau des aliases; Tableau récapitulatif, Tableau des aliases et tableau de plan; Tableau récapitulatif, tableau des aliases et tableau de plan; générateur d'aliases.

☞ Cliquez sur le bouton OK, lorsque vous avez terminez de faire vos choix.

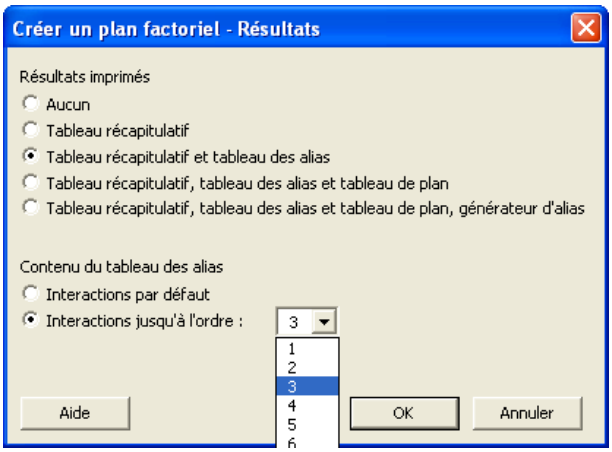


Figure 10 - Fenêtre permettant de fixer les sorties de l'analyse mathématique du plan.

3. EXEMPLE 01_MA_VOITURE

3.1 PRESENTATION DE L'EXEMPLE

Cet exemple est tiré du livre "Introduction aux Plans d'expériences" Quatrième édition paru chez Dunod Paris (page 15). Le lecteur y trouvera la description détaillée de l'étude, des objectifs à atteindre et des détails de l'expérimentation. Pour ce manuel consacré à l'utilisation de Minitab nous ne décrirons pas cette préparation. Sachez seulement qu'un automobiliste cherche à connaître l'influence de la vitesse et de la surcharge sur la consommation de sa voiture. Il décide de réaliser un plan factoriel complet 2^2.

Facteurs

Il y a deux facteurs qui définissent le domaine d'étude (Tableau 1)

Tableau 1 : Facteurs et domaine de l'étude 01_ma_voiture.

Facteur	Niveau bas (–)	Niveau haut (+)
Vitesse (1)	80 km/h	120 km/h
Surcharge (2)	0	300 kg

Réponse

La réponse est la consommation d'essence du véhicule en litres de carburant aux 100 kilomètres.

Objectif

C'est un objectif de connaissance qui servira à réduire les dépenses de transport.

Choix du plan

Les responsables de l'étude choisissent un plan 2^2.

3.2 CONSTRUCTION DU PLAN D'EXPERIENCES

Comme il s'agit d'un plan 2^2, les fenêtres de création d'un plan sont remplies comme la Figure 4.et la Figure 5.

☞ Cliquez sur le bouton OK de la Figure 5, vous obtenez la fenêtre de la Figure 11. Il n'y a qu'un choix.

☞ Cliquez sur le bouton OK de la Figure 11. Vous revenez à la Figure 5 dans laquelle les trois boutons (Facteurs, Options, Résultats) précédemment grisés sont maintenant accessibles.

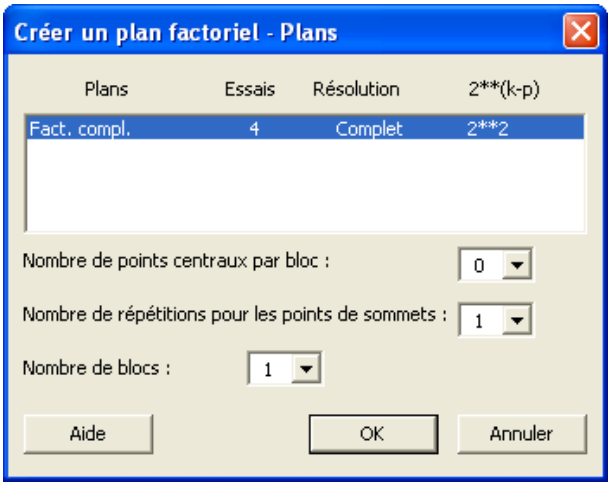


Figure 11 - Fenêtre permettant de choisir le plan.

Définition des facteurs

☞ Cliquez sur le bouton Facteurs de la Figure 5 et modifiez les noms des facteurs pour obtenir une fenêtre analogue à la Figure 12.

☞ Puis, cliquez sur le bouton OK.

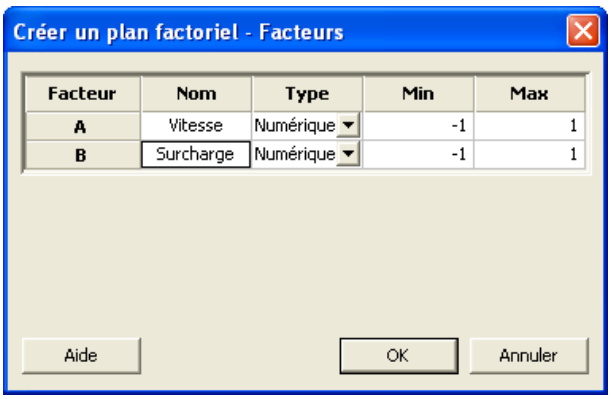


Figure 12 - Fenêtre permettant de préciser les facteurs.

☞ Cliquez sur le bouton OK de la fenêtre Créer un plan factoriel-Facteurs.

☞ Cliquez sur le bouton Options de la Figure 5, vous obtenez la fenêtre de la Figure 9. Vous choisissez Ne pas replier, vous décochez la case Randomiser les essais et vous laisser cochée la case Stocker le plan dans la feuille de travail.

☞ Cliquez sur le bouton OK de la fenêtre Créer un plan factoriel-Options.

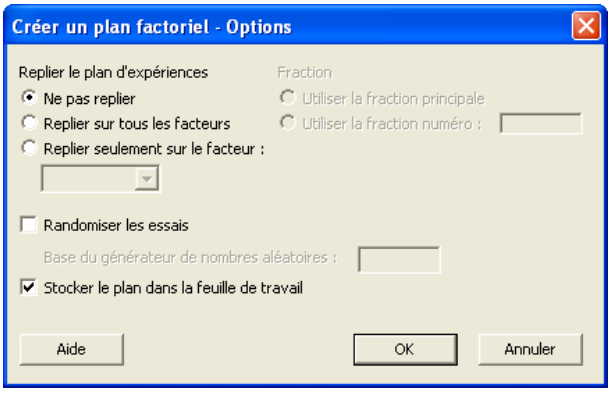


Figure 13 - Fenêtre permettant de préciser le plan d'expériences.

Choix des sorties

☞ Cliquez sur le bouton Résultats de la fenêtre de la Figure 5 et choisissez les résultats que vous désirez imprimer dans la fenêtre qui s'ouvre (Figure 14). Comme le plan est complet, il n'y a pas d'aliases.

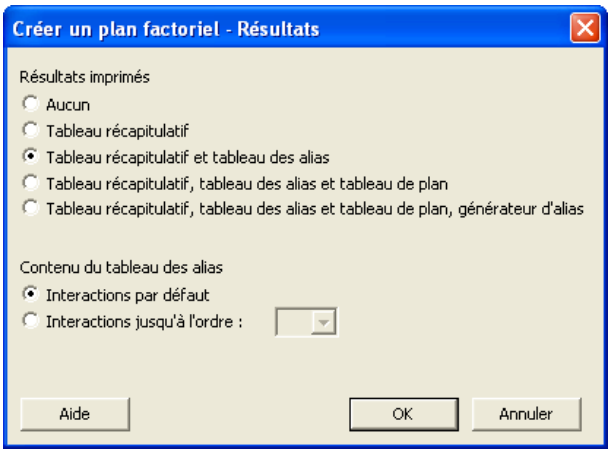

Créer un plan factoriel - Résultats
Résultats imprimés
Aucun
Tableau récapitulatif
Tableau récapitulatif et tableau des alias
Tableau récapitulatif, tableau des alias et tableau de plan
Tableau récapitulatif, tableau des alias et tableau de plan, générateur d'alias
Contenu du tableau des alias
Interactions par défaut
Interactions jusqu'à l'ordre :
Aide
OK
Annuler

Figure 14 - Fenêtre permettant d'indiquer les résultats de l'analyse mathématique que vous désirez imprimer.

Les informations qui ont été demandées sont enregistrées dans les deux fenêtres "Feuille de travail" et "Session ".

Feuille de travail

La feuille de travail se remplit alors de plusieurs colonnes (Figure 15) :

1. Colonne C1 Ordre standard
   C'est la présentation classique des plans d'expériences selon Yates.
2. Colonne C2 Ordre des essais.
   C'est l'ordre dans lequel les essais doivent être effectués. Ici, comme on n'a pas coché la case Randomiser les essais, les essais se présentent de la même manière que dans l'ordre de Yates.
3. Colonne C3 Point au centre.
4. Colonne C4 Blocs.

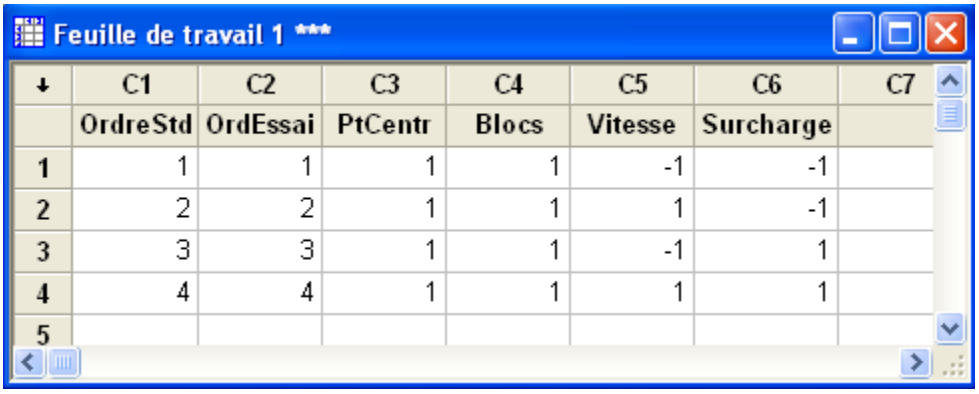
C'est le bloc auquel appartient l'essai. Ici, il n'y a pas de blocking et les essais sont tous dans le même bloc.

5. Colonne C5 : Vitesse

   C'est la colonne des niveaux du facteur "Vitesse".

6. Colonne C6 : Surcharge

   C'est la colonne des niveaux du facteur "Surcharge ".



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	OrdreStd	OrdEssai	PtCentr	Blocs	Vitesse	Surcharge	
1	1	1	1	1	-1	-1	
2	2	2	1	1	1	-1	
3	3	3	1	1	-1	1	
4	4	4	1	1	1	1	
5							

Figure 15 – Feuille de travail Minitab avec le plan choisi pour l'exemple 01_ma_voiture.

Session

La fenêtre session enregistre qu'il s'agit d'un plan factoriel complet de deux facteurs et de quatre essais sans point au centre et sans blocking (Figure 16).

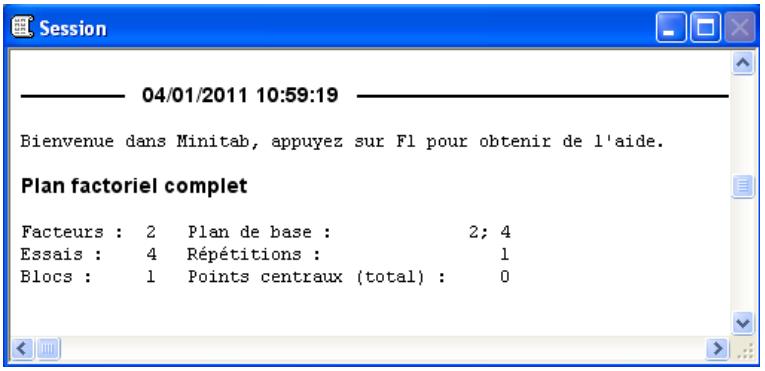
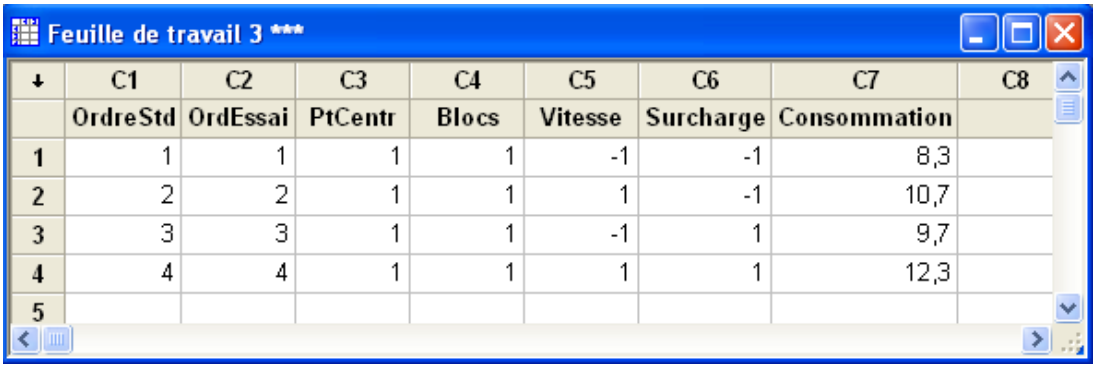

Session
04/01/2011 10:59:19
Bienvenue dans Minitab, appuyez sur F1 pour obtenir de l'aide.
Plan factoriel complet
Facteurs : 2 Plan de base : 2; 4
Essais : 4 Répétitions : 1
Blocs : 1 Points centraux (total) : 0

Figure 16 - Fenêtre session indiquant le plan choisi.

3.3. ANALYSE MATHEMATIQUE DE L'EXEMPLE 01_MAVOITURE

Lorsque les essais sont réalisés et que l'on possède toutes les réponses, on peut procéder à l'analyse mathématique ou statistique des résultats.

Il faut d'abord entrer les réponses dans une nouvelle colonne de la feuille de travail (Figure 17).



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	OrdreStd	OrdEssai	PtCentr	Blocs	Vitesse	Surcharge	Consommation	
1	1	1	1	1	-1	-1	8,3	
2	2	2	1	1	1	-1	10,7	
3	3	3	1	1	-1	1	9,7	
4	4	4	1	1	1	1	12,3	
5								

Figure 17 – Les réponses sont entrées dans la feuille de travail Minitab.

La feuille de travail étant prête, vous

☞ Cliquez sur Stat Du menu principal, vous obtenez un menu déroulant (Figure 18) dans lequel vous choisissez Analyser un plan factoriel. La fenêtre de la Figure 19 apparaît.

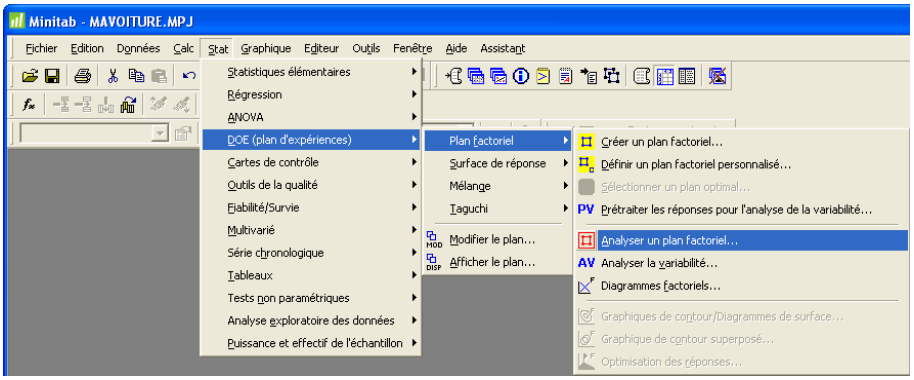


Figure 18 - Menus déroulants permettant de lancer l'analyse du plan d'expériences.

☞ Dans la fenêtre Analyser un plan factoriel vous devez choisir la réponse à analyser. Pour cela, vous surlignez C7 Consommation et vous cliquez sur le bouton Sélectionner.

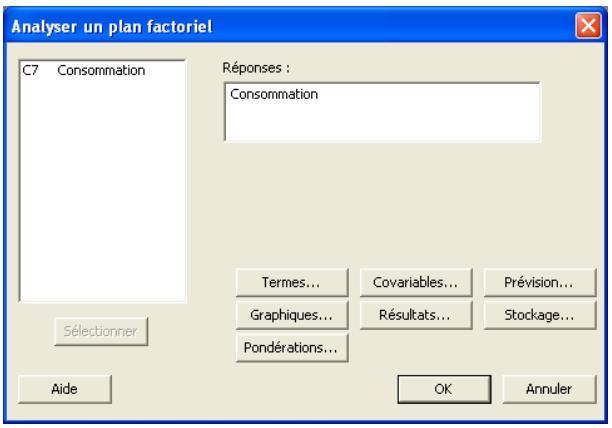


Figure 19 - Fenêtre permettant de préciser les modalités de l'analyse.

☞ Vous devez aussi choisir, dans cette même fenêtre, les caractéristiques de l'analyse (modèle, covariable), les graphiques de sortie, l'endroit où seront stockés les résultats. Le plan étant très simple nous n'utiliserons que les boutons Termes, Résultats et Stockage.

Termes

Permet de choisir le modèle mathématique. Ici nous choisissons un modèle polynomial avec une seule interaction (Figure 20).

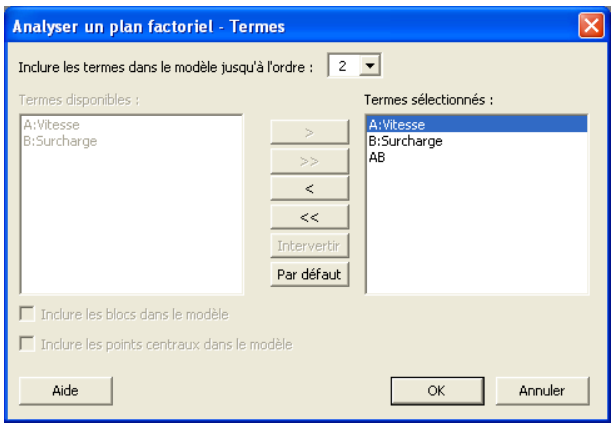


Figure 20 - Fenêtre permettant de choisir le modèle mathématique.

☞ Cliquez sur le bouton OK quand vous avez défini le modèle mathématique. Cette fenêtre disparaît.

Résultats

Nous désirons connaître les coefficients. Nous aurons en prime l'analyse de la variance et la valeur double des coefficients que Minitab appelle les effets conservant ainsi la définition historique de ceux-ci.

Nous savons qu'il n'y a pas d'aliases, nous cochons donc Ne pas afficher dans la rubrique Afficher le tableau des aliases (Figure 21).

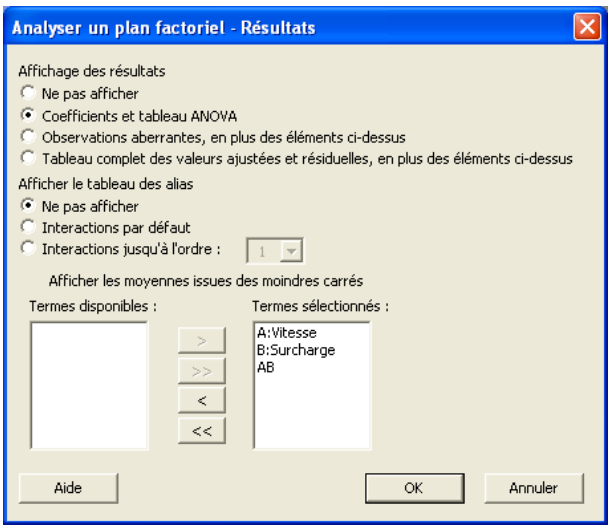


Figure 21 - Fenêtre permettant de sélectionner les résultats utiles.

☞ Cliquez sur le bouton OK quand vous avez terminé vos choix. Cette fenêtre disparaît.

Stockage

Nous choisissons de conserver les effets et les coefficients (Figure 22).

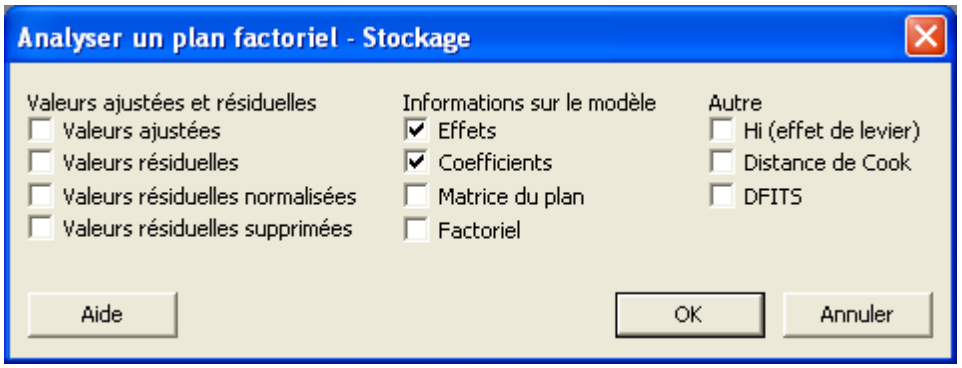


Figure 22 – Choix des sorties.

☞ Cliquez sur le bouton OK quand vous avez terminé vos choix. Cette fenêtre disparaît.

Pendant toutes ces opérations la Figure 19 est restée sur le fond de l'écran. Maintenant pour obtenir l'analyse il vous reste à :

☞ Cliquer sur le bouton OK de la Figure 19. Les résultats s'affichent dans la fenêtre de session (Figure 23) et dans la feuille de travail (Figure 24)

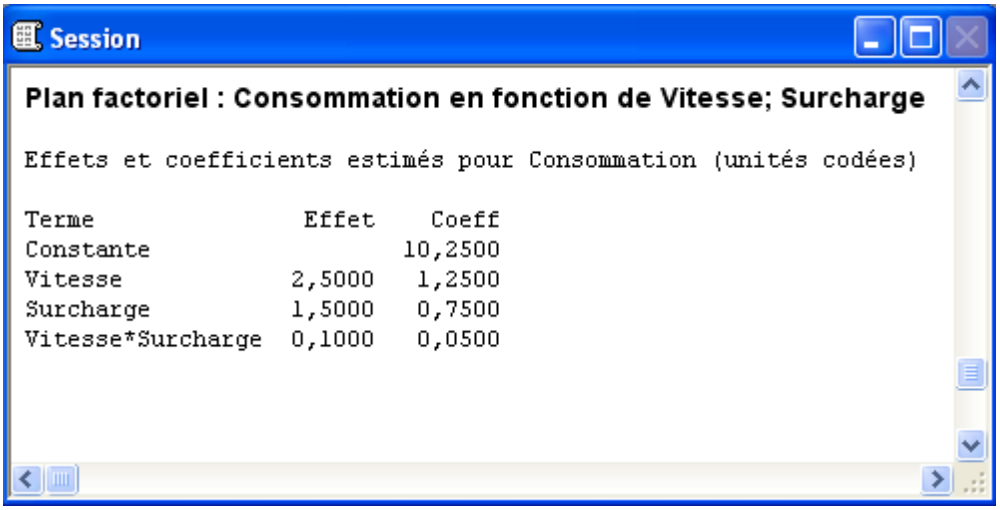
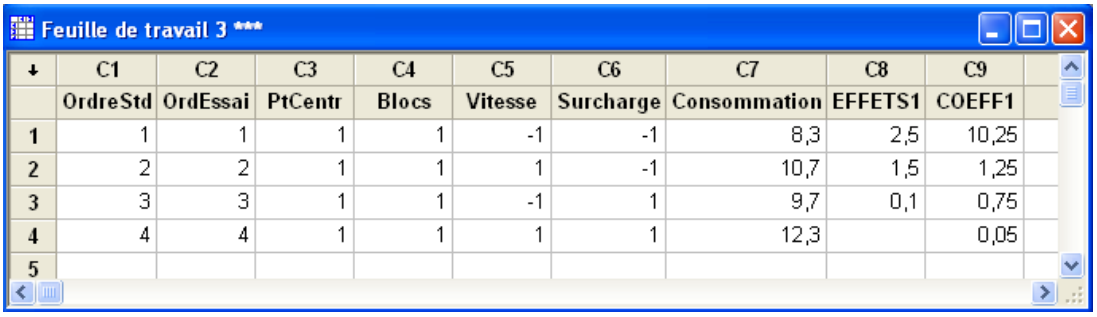

Session
Plan factoriel : Consommation en fonction de Vitesse; Surcharge
Effets et coefficients estimés pour Consommation (unités codées)
Terme Effet Coeff
Constante 10,2500
Vitesse 2,5000 1,2500
Surcharge 1,5000 0,7500
Vitesse*Surcharge 0,1000 0,0500

Figure 23 – Les résultats de l'analyse sont dans la fenêtre de session.


Feuille de travail 3 ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	OrdreStd	OrdEssai	PtCentr	Blocs	Vitesse	Surcharge	Consommation	EFFETS1	COEFF1
1	1	1	1	1	-1	-1	8,3	2,5	10,25
2	2	2	1	1	1	-1	10,7	1,5	1,25
3	3	3	1	1	-1	1	9,7	0,1	0,75
4	4	4	1	1	1	1	12,3		0,05
5									

Figure 24 - Les résultats de l'analyse s'affichentégalement dans la feuille de travail.

3.4 INTERPRETATION DE L'ANALYSE DU PLAN ET CONCLUSION

Il n'y a pratiquement pas d'interaction entre les deux facteurs. Que l'on roule vite ou lentement la surcharge entraine toujours une augmentation de consommation. Qu'il y ait surcharge ou non, une vitesse élevée entraine toujours une augmentation de consommation. Pour réduire la consommation il faut donc minimiser les surcharges et lever le pied le plus souvent possible.

****

4. EXEMPLE 02_BIJOUX

4.1 PRESENTATION DE L'EXEMPLE

Cet exemple est tiré du livre "Introduction aux Plans d'expériences" Quatrième édition paru chez Dunod Paris (page 31). Le lecteur trouvera, dans cet ouvrage, les détails de préparation du plan (description détaillée de l'étude, définition de l'objectif à atteindre, choix des réponses à mesurer, sélection des facteurs qui peuvent être influents sur la réponse, définition du domaine d'étude, recherche des contraintes et des difficultés possibles, etc.). Pour ce manuel Minitab, il faut savoir que les expérimentateurs étudient le dépôt d'or par électrolyse sur des objets métalliques afin de leur donner un aspect doré comparable aux bijoux de haut prix.

Facteurs

Il y a trois facteurs Leurs niveaux définisent le domaine d'étude (Tableau 2)

Tableau 2 : Facteurs et domaine d'étude de l'exemple 02_Bijoux

Facteur	Niveau bas (–)	Niveau haut (+)
Concentration en or (A)	2 g/L	15 g/L
Densité de courant (B)	5 A/dm^2	25 A/dm^2
Concentration en cobalt (C)	0,5 g/L	1,5 g/L

Réponse

La réponse est la vitesse de dépôt de l'or sur l'objet traité.

Objectif

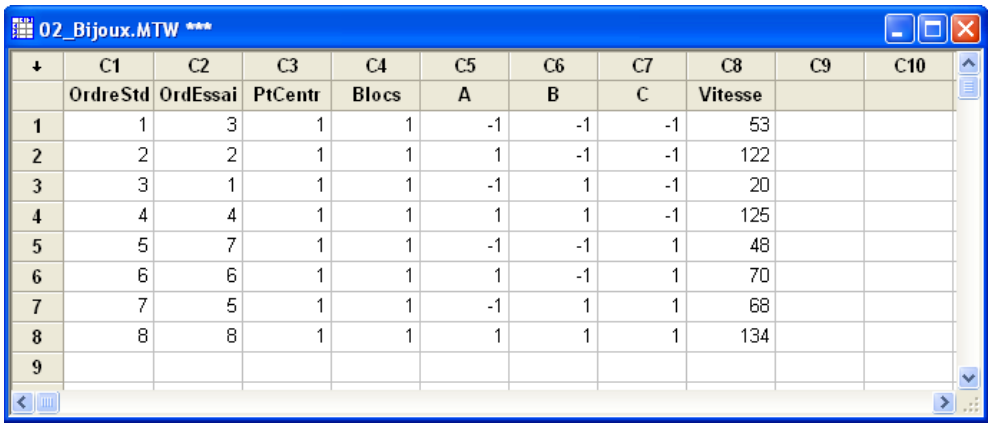
Les expérimentateurs recherchent une vitesse de dépôt élevée pour accélérer la fabrication.

Choix du plan

Les expérimentateurs décident de réaliser un plan factoriel complet 2^3.

4.2 CONSTRUCTION DU PLAN D'EXPERIENCES

La construction s'effectue de la même manière que précédemment. Il y a 3 facteurs et nous avons demandé une randomisation des essais. Vous devez obtenir une feuille de travail analogue à la Figure 25 après y avoir entré la réponse Vitesse. Vous remarquerez que le plan est présenté selon l'ordre standard c'est-à-dire l'ordre de Yates et que l'ordre d'exécution des essais est indiqué pour chaque essai. Il convient de bien différencier ces deux numéros pour éviter d'attribuer le résultat d'un essai à un autre essai. Ce qui entrainerait l'échec du plan d'expériences.



02_Bijoux.MTW ***

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	OrdreStd	OrdEssai	PtCentr	Blocs	A	B	C	Vitesse		
1	1	3	1	1	-1	-1	-1	53		
2	2	2	1	1	1	-1	-1	122		
3	3	1	1	1	-1	1	-1	20		
4	4	4	1	1	1	1	-1	125		
5	5	7	1	1	-1	-1	1	48		
6	6	6	1	1	1	-1	1	70		
7	7	5	1	1	-1	1	1	68		
8	8	8	1	1	1	1	1	134		
9										

Figure 25 – Feuille de travail avec les données de l' exemple 02_bijoux.

4.3 ANALYSE DU PLAN D'EXPERIENCES

L'analyse du plan s'effectue de la même manière que précédemment et vous devez obtenir dans la fenêtre session les mêmes informations que celles de la Figure 26.

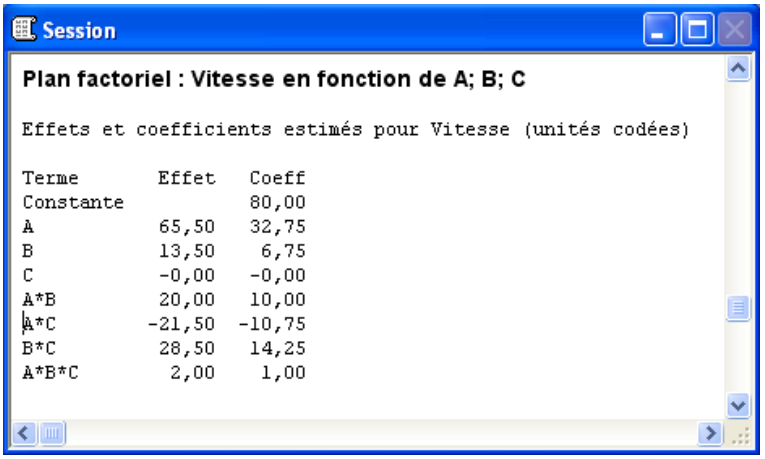


Figure 26 – Feuille Session avec les résultats : Effets et coefficients.

On peut illustrer ces résultats numériques par le graphique des effets.

☞ Cliquer sur le bouton Stat du menu principal puis choisissez DOE (plan d'expériences), Plan factoriel et Diagrammes factoriels (Figure 18). Vous obtenez une nouvelle fenêtre (Figure 27) dans laquelle vous pouvez choisir le graphique des effets, le graphique des interactions et le graphique en cube.

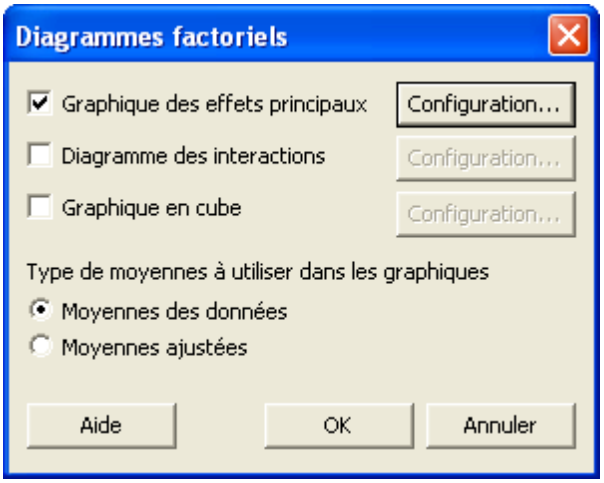


Figure 27 – Fenêtre permettant de choisir le graphique des effets, le graphique des interactions et le graphique en cube.

Graphique des effets

☞ Cochez Graphique des effets principaux dans la fenêtre de la Figure 27.

☞ Cliquer sur le bouton Configuration de la fenêtre de la Figure 27. Vous obtenez une fenêtre qui vous demandant la réponse et les facteurs que vous voulez illustrer (Figure 28).

☞ Pour mettre un titre au graphique, cliquez sur le bouton Options et remplissez la fenêtre qui s'ouvre.

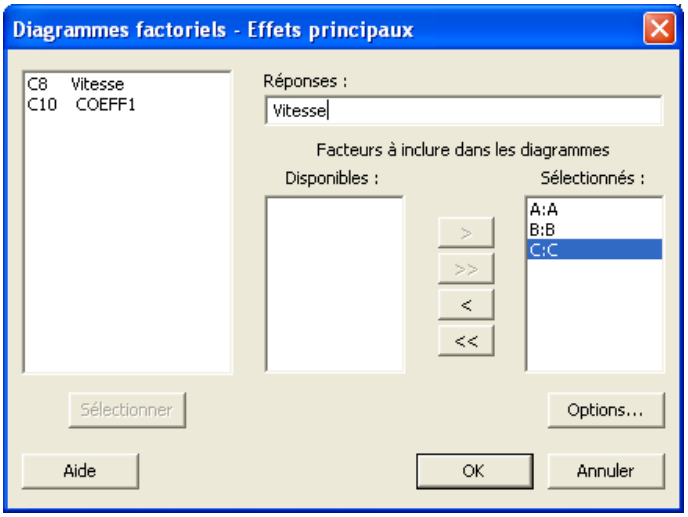


Figure 28 – Définition des graphiques des effets.

☞ Cliquer sur le bouton OK de la fenêtre de la Figure 28. Vous revenez à la Figure 27.

☞ Cliquer sur le bouton OK de la fenêtre de la Figure 27. Vous obtenez une fenêtre où se trouvent les graphiques demandés (Figure 29).

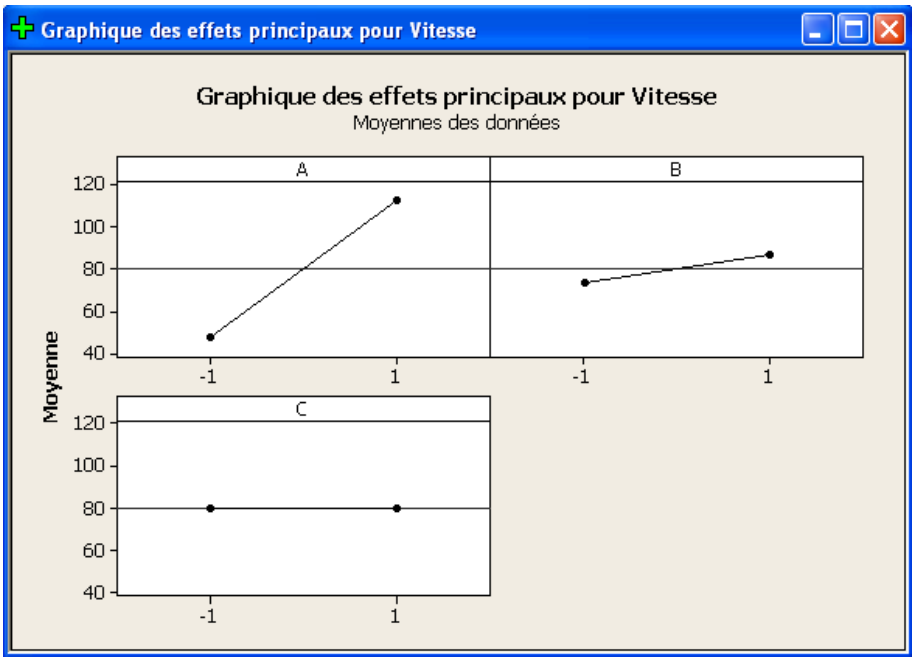


Figure 29 - Graphique des effets.

Graphique des interactions

Par un processus analogue, on obtient le graphique des interactions (Figure 30).

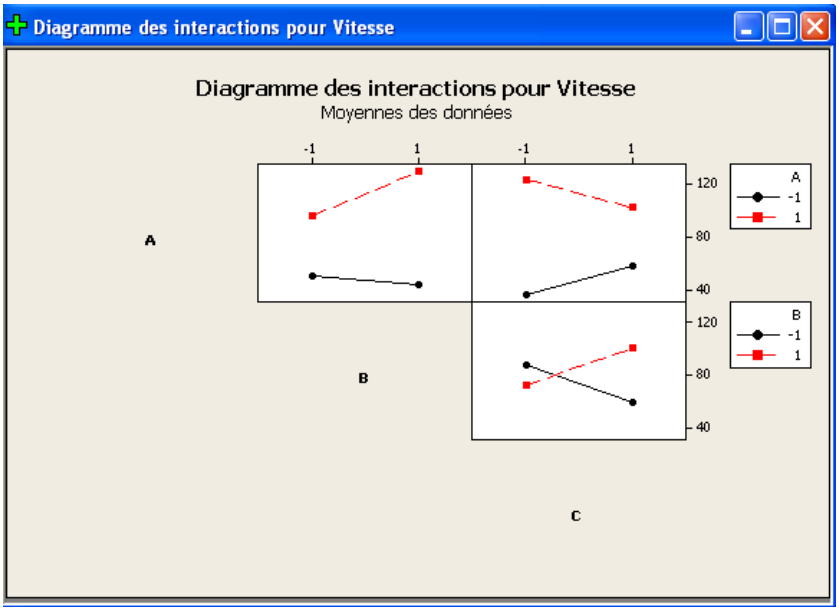


Figure 30 - Graphique des interactions.

Graphique en cube

De même pour le graphique en cube (Figure 31)

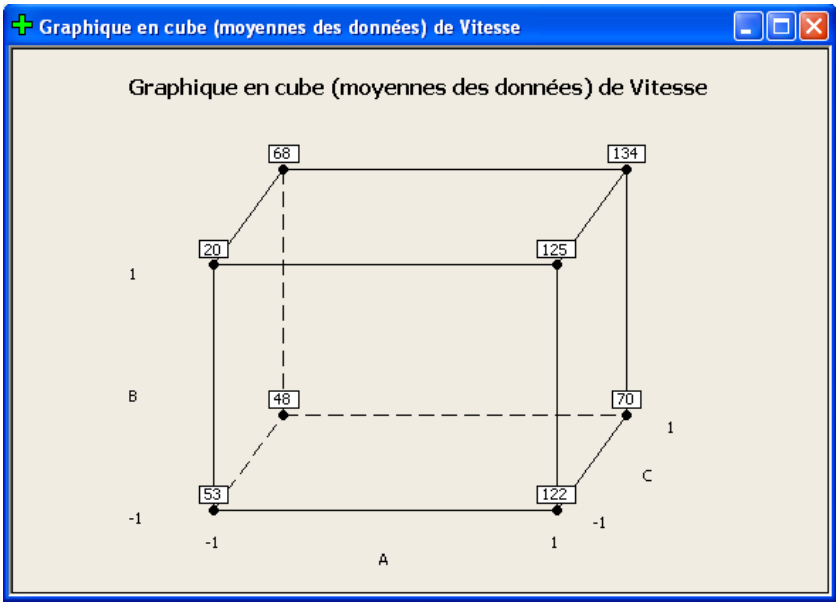


Figure 31 - Graphique en cube.

4.4 INTERPRETATION DE L'ANALYSE DU PLAN ET CONCLUSION

Tous les éléments précédents nous permettent de trouver les conditions qui maximisent la vitesse de dépôt de l'or.

- La Concentration en or (A) doit être au niveau +1 soit 15 g/l
- La Densité de courant (B) doit être au niveau +1 soit 25 A/dm^2

♦ La Concentration en cobalt (C) doit être au niveau +1 soit 1,5 g/L

Dans ces conditions on peut s'attendre à une vitesse de 134 mg/min.

Des essais de confirmation doivent être programmés et réalisés avant de diffuser ces résultats de l'interprétation. Ils permettront en outre d'avoir une idée de la dispersion des mesures.

****

5. EXEMPLE 03_GALETTE DES ROIS

5.1 PRESENTATION DE L'EXEMPLE

Cet exemple est tiré du livre "Introduction aux Plans d'expériences" Quatrième édition paru chez Dunod Paris (page 50). Le lecteur trouvera, dans cet ouvrage, les détails de préparation du plan (description détaillée de l'étude, définition de l'objectif à atteindre, choix des réponses à mesurer, sélection des facteurs qui peuvent être influents sur la réponse, définition du domaine d'étude, recherche des contraintes et des difficultés possibles, etc.)

Pour ce manuel consacré à l'utilisation de Minitab nous ne décrirons pas cette préparation du plan. Sachez seulement que l'objectif de l'étude est de connaître l'influence de 4 facteurs sur deux réponses pour éliminer deux défauts de fabrication des galettes des rois. Le premier défaut est le décollement des deux abaisses de la galette, le second défaut est l'apparition de fente (fêle en jargon de pâtisserie) dans le fond de la galette (abaisse inférieure).

Facteurs

Les pâtissiers définissent quatre facteurs et leurs niveaux hauts et bas.

Tableau 3 : Facteurs retenus et domaine d'étude de l'exemple 03_Galette des rois.

Facteur	Niveau bas	Niveau moyen	Niveau haut
Rapport du poids des abaisses (1)	0,90	1	1,1
Nombre de trous (2)	Peu	Normal	Beaucoup
Profil de chauffage (3)	Fort au début	Homogène	Fort à la fin
Durée de la cuisson (4)	29 min	30 min	31 min

Réponse

Les pâtissiers définissent deux réponses qui sont des défauts de fabrication : la première réponse est le décollement des deux abaisses de la galette. Ce décollement est noté zéro s'il y a beaucoup de parties décollées et trois s'il y en a peu.

La seconde réponse est la fêle, c'est-à-dire les fentes, qui se forment dans l'abaisse inférieure de la galette. La fêle est notée zéro s'il y a beaucoup de fentes et trois s'il y en a peu.

Objectif

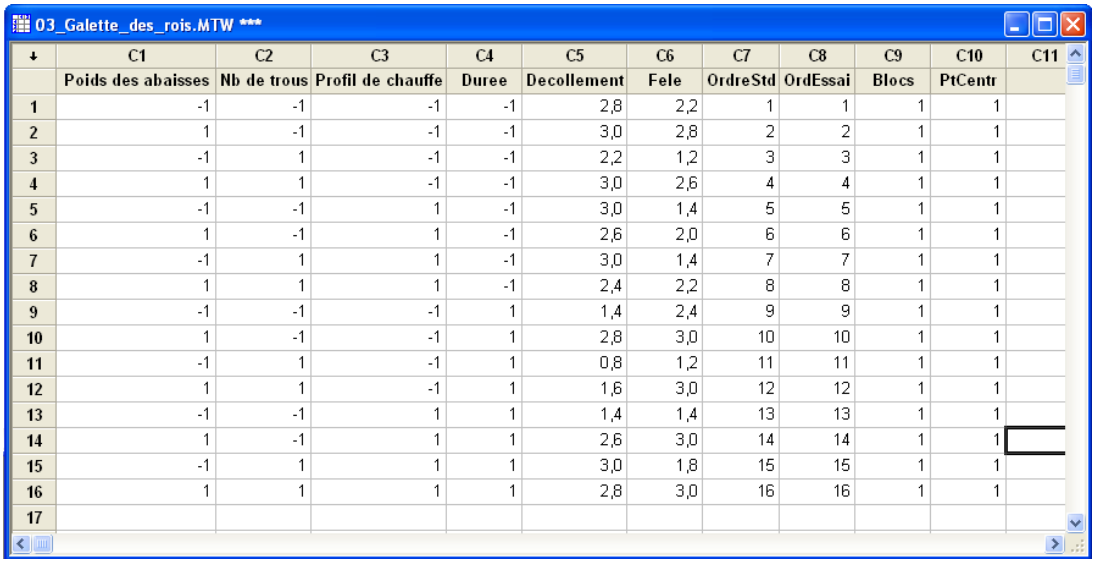
Les pâtissiers espèrent diminuer simultanément les deux défauts et visent donc une valeur proche de trois pour les deux réponses.

Choix du plan

Les pâtissiers décident de réaliser un plan factoriel complet 2^4.

5.2 CONSTRUCTION DU PLAN D'EXPERIENCES

La construction s'effectue de la même manière que précédemment. Il y a 4 facteurs et nous n'avons pas demandé la randomisation des essais. Vous devez obtenir une feuille de travail analogue à la Figure 32 après y avoir entré les deux réponses : décollement et fêle.



03_Galette_des_rois.MTW ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
	Poids des abaisses	Nb de trous	Profil de chauffe	Duree	Decollement	Fele	OrdreStd	OrdEssai	Blocs	PtCentr	
1	-1	-1	-1	-1	2,8	2,2	1	1	1	1	
2	1	-1	-1	-1	3,0	2,8	2	2	1	1	
3	-1	1	-1	-1	2,2	1,2	3	3	1	1	
4	1	1	-1	-1	3,0	2,6	4	4	1	1	
5	-1	-1	1	-1	3,0	1,4	5	5	1	1	
6	1	-1	1	-1	2,6	2,0	6	6	1	1	
7	-1	1	1	-1	3,0	1,4	7	7	1	1	
8	1	1	1	-1	2,4	2,2	8	8	1	1	
9	-1	-1	-1	1	1,4	2,4	9	9	1	1	
10	1	-1	-1	1	2,8	3,0	10	10	1	1	
11	-1	1	-1	1	0,8	1,2	11	11	1	1	
12	1	1	-1	1	1,6	3,0	12	12	1	1	
13	-1	-1	1	1	1,4	1,4	13	13	1	1	
14	1	-1	1	1	2,6	3,0	14	14	1	1	
15	-1	1	1	1	3,0	1,8	15	15	1	1	
16	1	1	1	1	2,8	3,0	16	16	1	1	
17											

Figure 32 - Feuille de travail avec les données de l'exemple 03_Galette des rois.

Si vous voulez sauter l'étape de construction du plan, vous pouvez télécharger le fichier de cette feuille de travail sur le site Internet suivant :

http://www.plansdexperiences.com.

5.3 ANALYSE DU PLAN D'EXPERIENCES

Comme précédemment :

☞ Cliquez sur Stat du menu principal et choisissez DOE(plan d'expériences) / Plan factoriel / Analyser un plan factoriel (Figure 18)

☞ Dans la fenêtre Analyser un plan factoriel qui apparaît vous choisissez les réponses à analyser et les caractéristiques de l'analyse (le modèle, résultats, stockage). En particulier pour le modèle, vous choisissez un polynôme jusqu'à l'interaction d'ordre 4, soit ABCD, interaction que l'on ne voit pas sur la Figure 33.

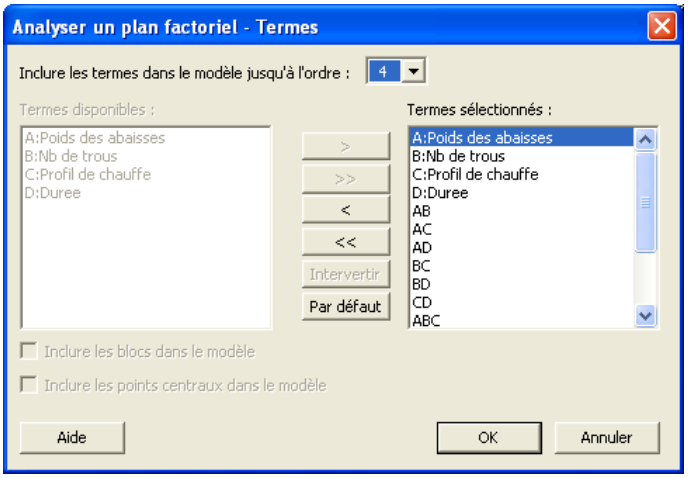


Figure 33 – Choix du modèle. Les interactions sont bien présentes lorsqu'on manipule la glissière.

Les résultats des calculs apparaissent dans la fenêtre Session (Figure 34) et les coefficients du modèle figurent dans deux colonnes de la feuille de travail (Figure 35).

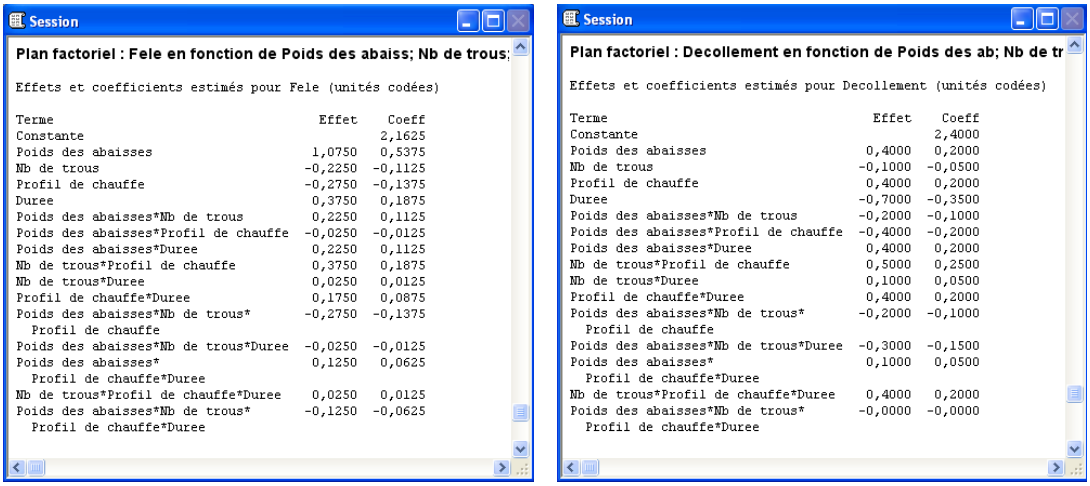
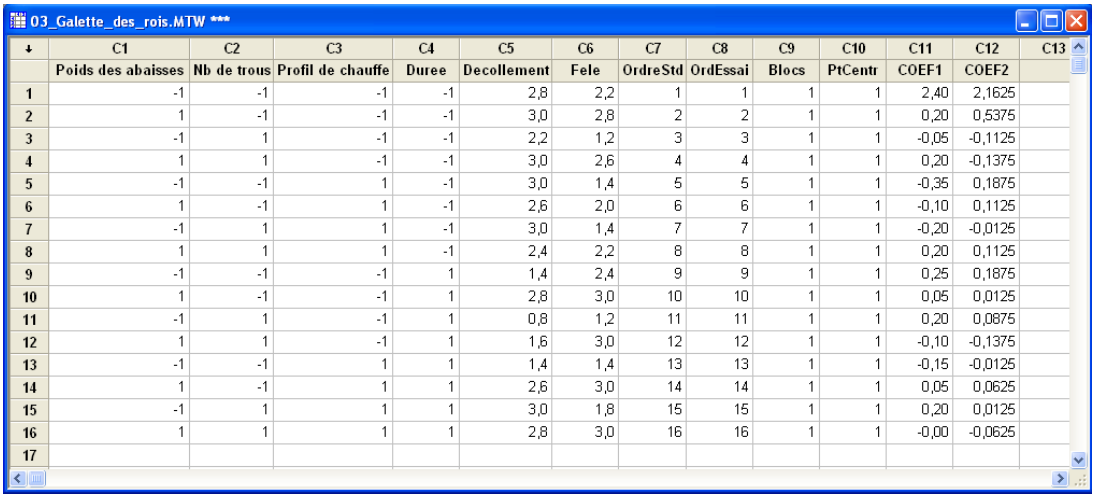

Session
Plan factoriel : Fele en fonction de Poids des abaiss; Nb de trous;
Effets et coefficients estimés pour Fele (unités codées)
Terme Effet Coeff
Constante 2,1625
Poids des abaisses 1,0750 0,5375
Nb de trous -0,2250 -0,1125
Profil de chauffe -0,2750 -0,1375
Duree 0,3750 0,1875
Poids des abaisses*Nb de trous 0,2250 0,1125
Poids des abaisses*Profil de chauffe -0,0250 -0,0125
Poids des abaisses*Duree 0,2250 0,1125
Nb de trous*Profil de chauffe 0,3750 0,1875
Nb de trous*Duree 0,0250 0,0125
Profil de chauffe*Duree 0,1750 0,0875
Poids des abaisses*Nb de trous* -0,2750 -0,1375
Profil de chauffe
Poids des abaisses*Nb de trous*Duree -0,0250 -0,0125
Poids des abaisses* 0,1250 0,0625
Profil de chauffe*Duree
Nb de trous*Profil de chauffe*Duree 0,0250 0,0125
Poids des abaisses*Nb de trous* -0,1250 -0,0625
Profil de chauffe*Duree
Session
Plan factoriel : Decollement en fonction de Poids des ab; Nb de tr
Effets et coefficients estimés pour Decollement (unités codées)
Terme Effet Coeff
Constante 2,4000
Poids des abaisses 0,4000 0,2000
Nb de trous -0,1000 -0,0500
Profil de chauffe 0,4000 0,2000
Duree -0,7000 -0,3500
Poids des abaisses*Nb de trous -0,2000 -0,1000
Poids des abaisses*Profil de chauffe -0,4000 -0,2000
Poids des abaisses*Duree 0,4000 0,2000
Nb de trous*Profil de chauffe 0,5000 0,2500
Nb de trous*Duree 0,1000 0,0500
Profil de chauffe*Duree 0,4000 0,2000
Poids des abaisses*Nb de trous* -0,2000 -0,1000
Profil de chauffe
Poids des abaisses*Nb de trous*Duree -0,3000 -0,1500
Poids des abaisses* 0,1000 0,0500
Profil de chauffe*Duree
Nb de trous*Profil de chauffe*Duree 0,4000 0,2000
Poids des abaisses*Nb de trous* -0,0000 -0,0000
Profil de chauffe*Duree

Figure 34 – Les effets et les coefficients des modèles figurent dans la fenêtre Session.



03_Galette_des_rois.MTW ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
	Poids des abaisses	Nb de trous	Profil de chauffe	Duree	Decollement	Fele	OrdreStd	OrdEssai	Blocs	PtCentr	COEF1	COEF2	
1	-1	-1	-1	-1	2,8	2,2	1	1	1	1	2,40	2,1625	
2	1	-1	-1	-1	3,0	2,8	2	2	1	1	0,20	0,5375	
3	-1	1	-1	-1	2,2	1,2	3	3	1	1	-0,05	-0,1125	
4	1	1	-1	-1	3,0	2,6	4	4	1	1	0,20	-0,1375	
5	-1	-1	1	-1	3,0	1,4	5	5	1	1	-0,35	0,1875	
6	1	-1	1	-1	2,6	2,0	6	6	1	1	-0,10	0,1125	
7	-1	1	1	-1	3,0	1,4	7	7	1	1	-0,20	-0,0125	
8	1	1	1	-1	2,4	2,2	8	8	1	1	0,20	0,1125	
9	-1	-1	-1	1	1,4	2,4	9	9	1	1	0,25	0,1875	
10	1	-1	-1	1	2,8	3,0	10	10	1	1	0,05	0,0125	
11	-1	1	-1	1	0,8	1,2	11	11	1	1	0,20	0,0875	
12	1	1	-1	1	1,6	3,0	12	12	1	1	-0,10	-0,1375	
13	-1	-1	1	1	1,4	1,4	13	13	1	1	-0,15	-0,0125	
14	1	-1	1	1	2,6	3,0	14	14	1	1	0,05	0,0625	
15	-1	1	1	1	3,0	1,8	15	15	1	1	0,20	0,0125	
16	1	1	1	1	2,8	3,0	16	16	1	1	-0,00	-0,0625	
17													

Figure 35 – Les coefficients des modèles figurent dans la feuille de travail.

Pour la réponse fêle, c'est-à-dire les fentes dans l'épaisseur de la pate, l'influence du facteur "Rapport du poids des abaisses" est plus importante que pour les autres facteurs. On constate également que l'influence des facteurs B, C et D est du même ordre de grandeur que les interactions.

Pour la réponse décollement, tous les effets principaux et toutes les interactions ont pratiquement la même influence en valeur absolue.

L'interprétation va nous être facilitée par l'utilisation de l'optimiseur de Minitab.

5.4 L'OPTIMISEUR DE MINITAB

☞ Cliquez sur Stat du menu principal et choisissez DOE(plan d'expériences) / Plan factoriel / Optimisation des réponses (Figure 18).

La fenêtre de la Figure 36 apparaît. Vous sélectionnez les deux réponses: Fêle et Décollement.

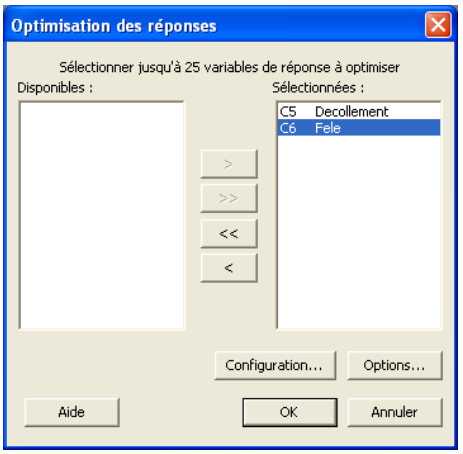


Figure 36 – Fenêtre Optimisation des réponses permettant de choisir les réponses à optimiser.

☞ Cliquez sur le bouton Configuration. Vous obtenez une nouvelle fenêtre qu'il faut remplir.

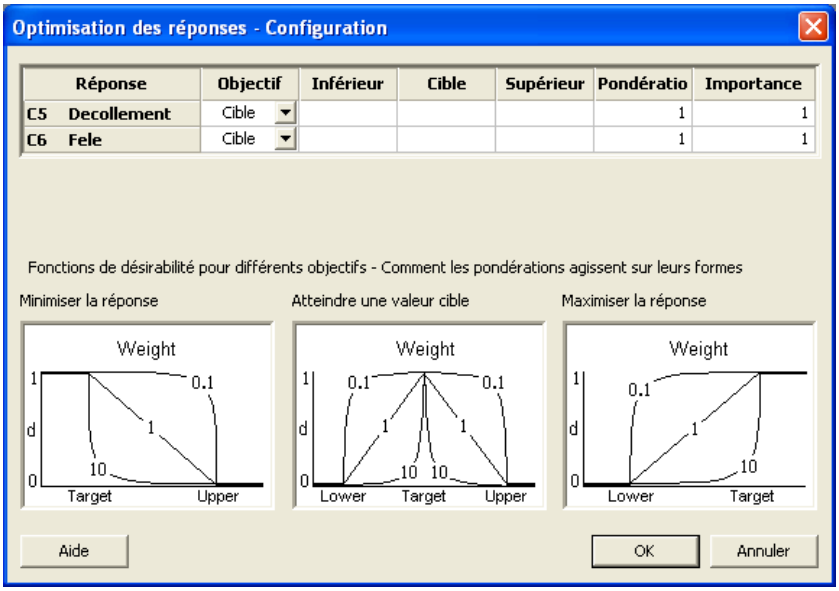


Figure 37 – Fenêtre de l'optimiseur avant indication des désirs de l'expérimentateur.

5.5 INTERPRETATION DE L'ANALYSE DU PLAN ET CONCLUSION

Nous allons nous donner comme objectif d'atteindre au moins 2,8 pour les deux réponses. Une valeur de 2 pour le décollement est tout juste acceptable et une valeur de 2,8 est très bonne. Pour la fêle il faut au moins atteindre 2,5 et 2,8 est très bien. Nous allons utiliser ces valeurs pour ajuster la désirabilité.

- ☞ Parmi les trois possibilités choisissez Maximiser.
- ☞ Pour le Décollement choisissez 2 pour la case Inférieur et 2,8 pour la case Cible.
- ☞ Pour la Fêle choisissez 2,5 pour la case Inférieur et 2,8 pour la case Cible (Figure 38).

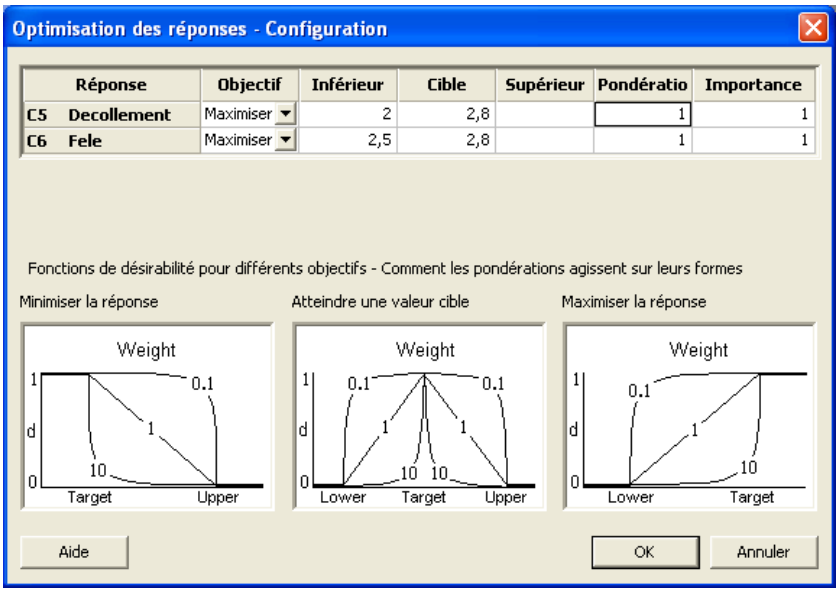


Figure 38 – Fenêtre permettant de définir la Désirabilité.

☞ Cliquez sur le bouton OK. Vous revenez à la Figure 36.

☞ Maintenant cliquez sur le bouton Options de la Figure 36. Vous obtenez la Figure 39 dans laquelle vous choisissez les options de sorties : "Diagramme des optimisatoins" et "Afficher les solutions locales".

☞ Cliquez sur le bouton OK. Vous revenez à la Figure 36.

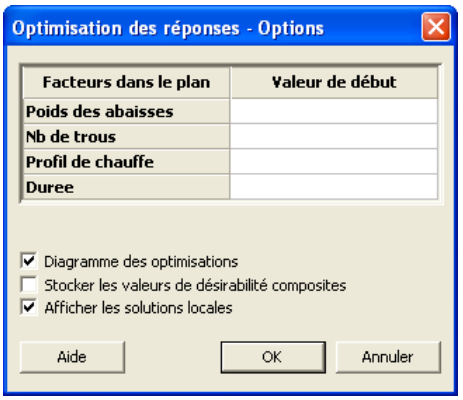


Figure 39 – Fenêtre permettant de définir la Désirabilité.

☞ Cliquez sur le bouton OK de la Figure 36. Vous obtenez la Figure 40 qui vous indique que pour obtenir une désirabilité de 1, il faut régler :

- Le rapport du poids des abaisses (A) au niveau +1 (soit 1,1 en unités normales).
- Le nombre de trous (B) au niveau -1 (soit Peu de trous).
- Le Profil de chauffage (C) au niveau -1 (soit Fort au début).
- La durée de la cuisson (D) au niveau +1 (soit 31 minutes).

Le décollement sera alors de 2,8 et la fêle de 3. C'est-à-dire qu'il n'y aura pas de fentes et que les décollements seront rares.

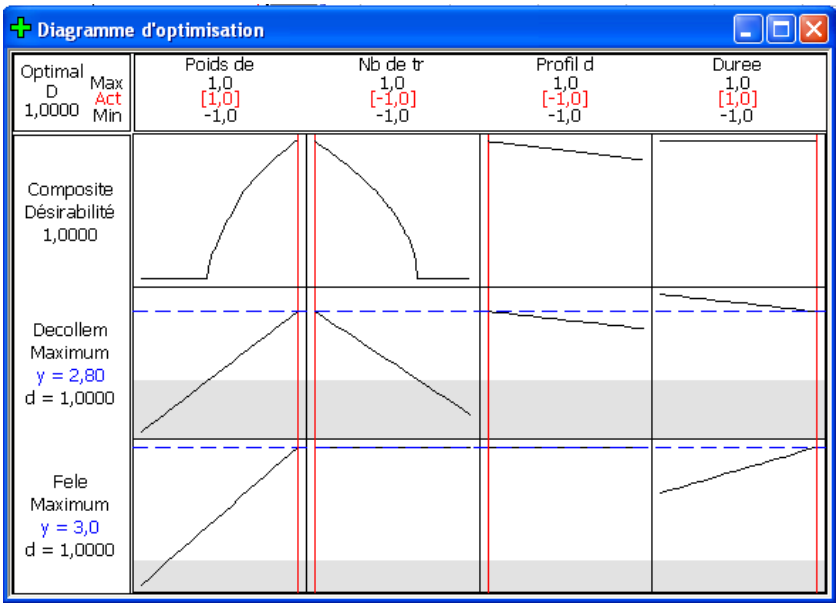


Figure 40 – L'optimiseur donne les niveaux des facteurs qui maximisent simultanément les deux réponses.

On retrouve ces mêmes résultats dans la fenêtre Session (Figure 41).

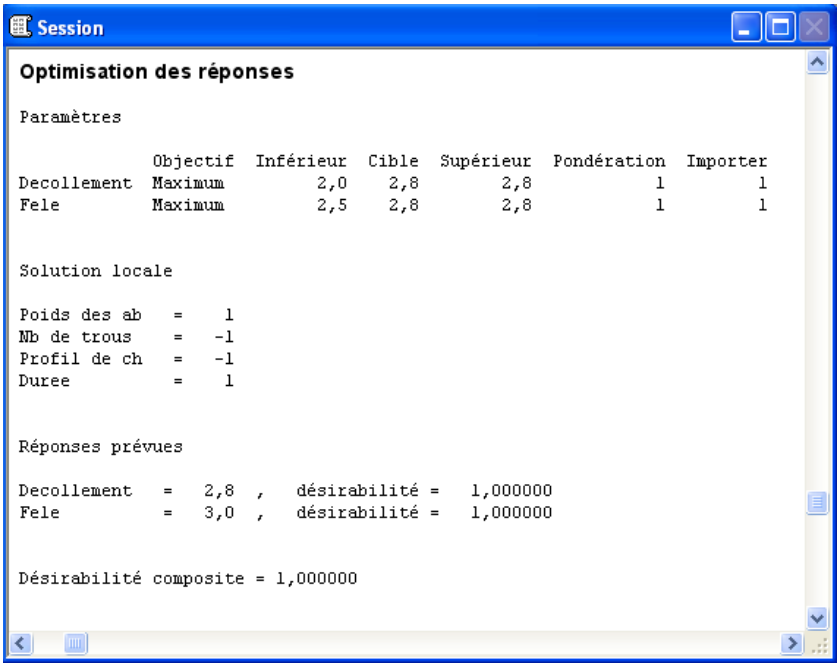

Session
Optimisation des réponses
Paramètres
Objectif Inférieur Cible Supérieur Pondération Importer
Decollement Maximum 2,0 2,8 2,8 1 1
Fele Maximum 2,5 2,8 2,8 1 1
Solution locale
Poids des ab = 1
Nb de trous = -1
Profil de ch = -1
Duree = 1
Réponses prévues
Decollement = 2,8 , désirabilité = 1,000000
Fele = 3,0 , désirabilité = 1,000000
Désirabilité composite = 1,000000

Figure 41 – Choix du modèle. Les interactions sont bien présentes lorsqu'on manipule la glissière.

****

6. EXEMPLE 06_SULFONATION

6.1 PRESENTATION DE L'EXEMPLE

Cet exemple est tiré du livre "Introduction aux Plans d'expériences" Quatrième édition paru chez Dunod Paris (page 116). Le lecteur y trouvera les détails de préparation du plan (description détaillée de l'étude, définition de l'objectif à atteindre, choix les réponses à mesurer, sélection des facteurs qui peuvent être influents sur la réponse et définition du domaine d'étude, recherche des contraintes et des difficultés possibles, etc.)

Pour ce manuel consacré à l'utilisation de Minitab nous ne décrirons pas cette préparation du plan. Sachez seulement que la mise au point d'un procédé de fabrication de détergents nécessite la transformation d'un mélanges composé de trois produits : le benzène, le toluène et le xylène. Mais seule la transformation du toluène et du xylène est intéressante et surtout on voudrait ne pas modifier le benzène. L'objectif est donc de transformer le toluène et le xylène sans toucher au benzène. Comme il y a six facteurs les expérimentateurs décident de faire un plan fractionnaire de 16 essais.

Facteurs

Il y a six facteurs dont le domaine est défini dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Facteurs retenus et domaine d'étude de l'exemple 06_Sulfonation.

Facteurs	Niveau - 1	Niveau + 1
Durée de la réaction (1)	5 heures	9 heures
SO_3 dans SO_4H_2 (2)	0%	10%
Température de la réaction (3)	95°C	110°C
Élimination de l'eau (4)	sans	avec
Durée de l'addition d'acide (5)	10 min	30 min
Rapport acide/ toluène +xylènes (6)	0,8	1,2

Réponse

La réponse est le rapport du poids de la somme du toluène et des xylènes transformée au poids du benzène transformé, soit :

$$\rho = \frac{(Toluène + Xylènes)\ transformés}{Benzène\ transformé}$$

Objectif

On désire beaucoup de toluène et de xylènes transformés et peu de benzène transformé. On vise donc la plus forte valeur possible pour le rapport précédent.

Choix du plan

Les expérimentateurs décident de réaliser un factoriel fractionnaire 2^{6-2} de 16 essais, en choisissant avec soin les confusions.

6.2 CONSTRUCTION DU PLAN D'EXPERIENCES

Il s'agit de construire un plan fractionnaire dont les aliases sont imposés. On débute, comme d'habitude pour créer un plan, en appelant la fenêtre de la Figure 4. Dans la fenêtre de création vous choisissez un plan à deux niveaux dont les aliases seront spécifiés et vous indiquez qu'il y a 4 facteurs principaux (Figure 42). Les deux autres facteurs supplémentaires seront ajoutés ensuite avec leurs aliases.

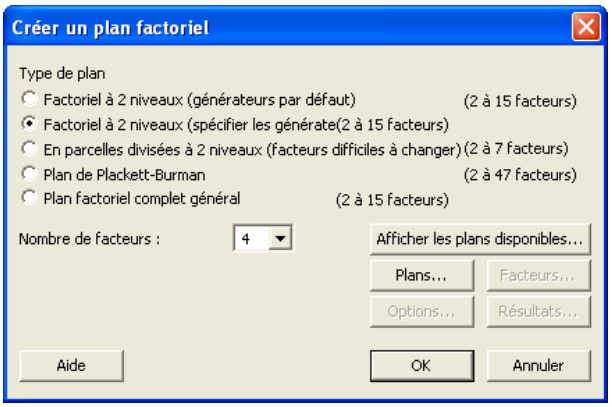

Créer un plan factoriel
Type de plan
Factoriel à 2 niveaux (générateurs par défaut) (2 à 15 facteurs)
Factoriel à 2 niveaux (spécifier les générate(2 à 15 facteurs)
En parcelles divisées à 2 niveaux (facteurs difficiles à changer) (2 à 7 facteurs)
Plan de Plackett-Burman (2 à 47 facteurs)
Plan factoriel complet général (2 à 15 facteurs)
Nombre de facteurs :
4
Afficher les plans disponibles...
Plans...
Facteurs...
Options...
Résultats...
Aide
OK
Annuler

Figure 42 – Création du plan factoriel fractionnaire dont les aliases sont imposés.

☞ Cliquez sur le bouton Plans. Apparaît une nouvelle fenêtre dans laquelle vous devez choisir le plan à 16 essais (Figure 43)

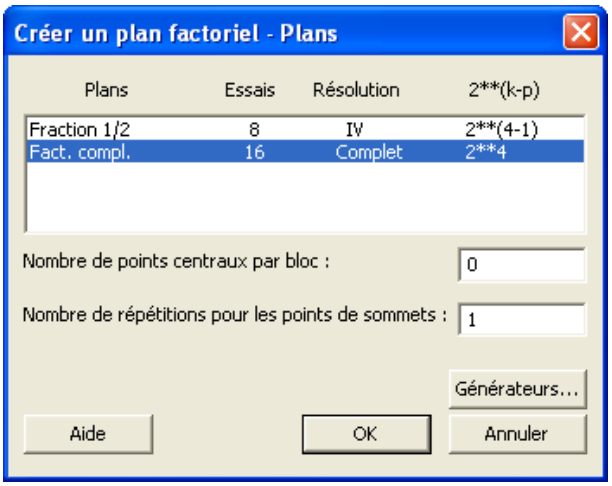


Figure 43 – Choix du plan à 16 essais.

☞ Cliquez sur le bouton Générateurs. Apparaît une nouvelle fenêtre qui vous permet d'entrer les générateurs que vous voulez (Figure 44)

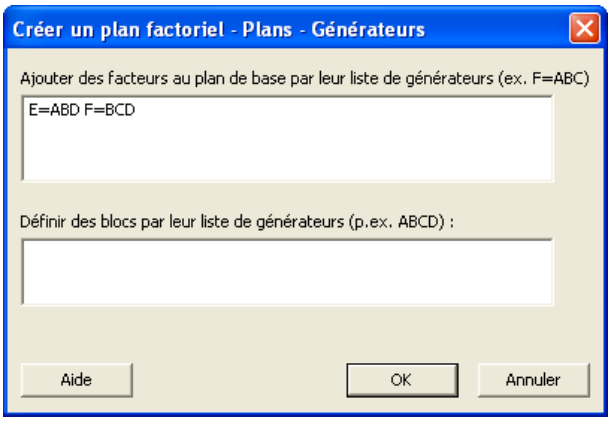

Créer un plan factoriel - Plans - Générateurs
Ajouter des facteurs au plan de base par leur liste de générateurs (ex. F=ABC)
E=ABD F=BCD
Définir des blocs par leur liste de générateurs (p.ex. ABCD) :
Aide
OK
Annuler

Figure 44 – L'expérimentateur impose ses propres aliases.

☞ Cliquez sur le bouton OK. Vous revenez à la Figure 43.

☞ Cliquez sur le bouton OK. Vous revenez à la Figure 42. Dans les options vous décochez la randomisation.

☞ Cliquez sur le bouton OK. Vous obtenez le plan dans la feuille de travail et la structure des aliases dans la fenêtre Session.

Feuille de travail 1 ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
	OrdreStd	OrdEssai	PtCentr	Blocs	A	B	C	D	E	F	
1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
2	2	2	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	
3	3	3	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	
4	4	4	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	
5	5	5	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	
6	6	6	1	1	1	-1	1	-1	1	1	
7	7	7	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	
8	8	8	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	
9	9	9	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	
10	10	10	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	
11	11	11	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	
12	12	12	1	1	1	1	-1	1	1	-1	
13	13	13	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	
14	14	14	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	
15	15	15	1	1	-1	1	1	1	-1	1	
16	16	16	1	1	1	1	1	1	1	1	
17											

Figure 45 – Feuille de travail avec la matrice d'expériences de l'exemple 06_Sulfonation.

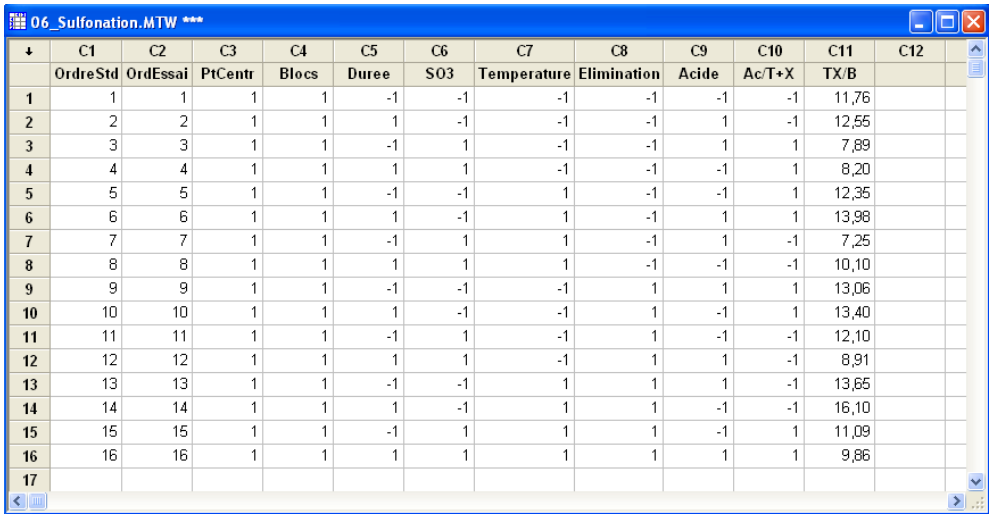
Session

```
Structure des alias

I + ABDE + ACEF + BCDF

A + BDE + CEF
B + ADE + CDF
C + AEF + BDF
D + ABE + BCF
E + ABD + ACF
F + ACE + BCD
AB + DE + ACDF + BCEF
AC + EF + ABDF + BCDE
AD + BE + ABCF + CDEF
AE + BD + CF
AF + CE + ABCD + BDEF
BC + DF + ABEF + ACDE
BF + CD + ABCE + ADEF
ABC + ADF + BEF + CDE
ABF + ACD + BCE + DEF
```

Figure 46 – Structure des aliases.

6.3 ANALYSE DU PLAN D'EXPERIENCES

Pour que les explications soient plus claires vous pouvez modifier le nom des facteurs. Par exemple au lieu de laisser A pour le premier facteur, vous mettez Durée et vous faites de même pour les 5 autres facteurs. Lorsque vous avez fait les essais, vous entrez les réponses dans la feuille de travail de la Figure 45. Vous avez maintenant une feuille de travail analogue à la Figure 47.



06_Sulfonation.MTW ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
	OrdreStd	OrdEssai	PtCentr	Blocs	Duree	SO3	Temperature	Elimination	Acide	Ac/T+X	TX/B	
1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	11,76	
2	2	2	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	12,55	
3	3	3	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	7,89	
4	4	4	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	8,20	
5	5	5	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	12,35	
6	6	6	1	1	1	-1	1	-1	1	1	13,98	
7	7	7	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	7,25	
8	8	8	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	10,10	
9	9	9	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	13,06	
10	10	10	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	13,40	
11	11	11	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	12,10	
12	12	12	1	1	1	1	-1	1	1	-1	8,91	
13	13	13	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	13,65	
14	14	14	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	16,10	
15	15	15	1	1	-1	1	1	1	-1	1	11,09	
16	16	16	1	1	1	1	1	1	1	1	9,86	
17												

Figure 47 – Feuille de travail prête pour faire l'analyse des résultats.

Comme précédemment :

☞ Cliquez sur Stat du menu principal et choisissez Analyser un plan factoriel.

☞ Dans la fenêtre Analyser un plan factoriel qui apparaît vous choisissez les caractéristiques de l'analyse et en particulier, pour le modèle polynomial, vous adoptez un modèle comprenant le coefficient constant, les coefficients des facteurs principaux et les coefficients des interactions d'ordre 2.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + \ldots + a_{56}x_5x_6$$

On a donc un système de 16 équations pour trouver 22 inconnues. On sait qu'il y a alors des confusions entre les interactions d'ordre 2 et le logiciel va vous les indiquer.

☞ Cliquez sur le bouton Termes de la fenêtre Analyser un plan factoriel. Attention le logiciel propose un modèle n'ayant pas toutes les interactions. Il vous faut donc le compléter en faisant passer les interactions d'ordre 2 de la case de gauche à la case de droite (Figure 48). De même le logiciel introduit deux interactions d'ordre 3 dans le modèle. Il faut les éliminer.

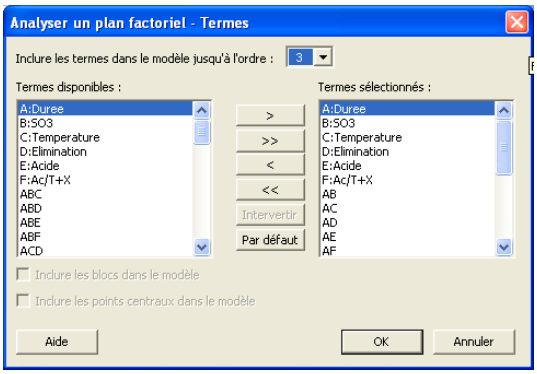
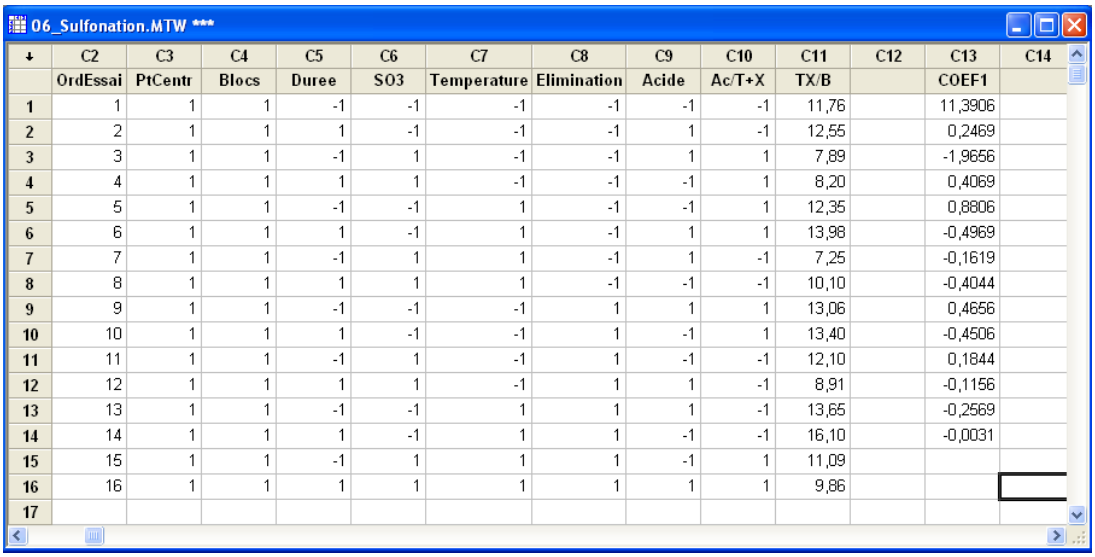


Figure 48 – Fenêtre permettant d'entrer le modèle mathématique.

Quand le modèle est entré :

☞ Cliquez sur le bouton OK. Vous revenez à la fenêtre Analyser un plan factoriel.

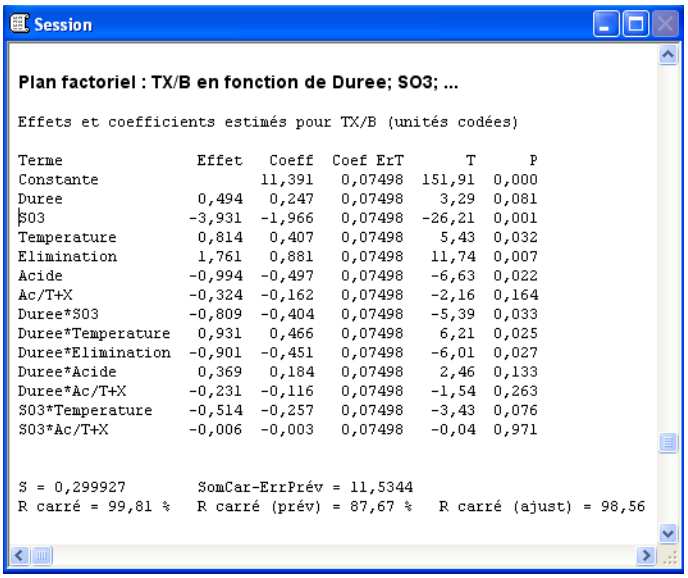
☞ Cliquez sur le bouton OK de cette dernière fenêtre. Les coefficients du modèle s'affichent dans la feuille de travail (Figure 49) et les résultats statistiques dans la fenêtre Session (Figure 50).



06_Sulfonation.MTW ***

	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
	OrdEssai	PtCentr	Blocs	Duree	SO3	Temperature	Elimination	Acide	Ac/T+X	TX/B		COEF1	
1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	11,76		11,3906	
2	2	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	12,55		0,2469	
3	3	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	7,89		-1,9656	
4	4	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	8,20		0,4069	
5	5	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	12,35		0,8806	
6	6	1	1	1	-1	1	-1	1	1	13,98		-0,4969	
7	7	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	7,25		-0,1619	
8	8	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	10,10		-0,4044	
9	9	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	13,06		0,4656	
10	10	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	13,40		-0,4506	
11	11	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	12,10		0,1844	
12	12	1	1	1	1	-1	1	1	-1	8,91		-0,1156	
13	13	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	13,65		-0,2569	
14	14	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	16,10		-0,0031	
15	15	1	1	-1	1	1	1	-1	1	11,09			
16	16	1	1	1	1	1	1	1	1	9,86			
17													

Figure 49 – Les coefficients du modèle s'affichent dans la feuille de travail.



Session

Plan factoriel : TX/B en fonction de Duree; SO3; ...

Effets et coefficients estimés pour TX/B (unités codées)

Terme	Effet	Coeff	Coef ErT	T	P
Constante		11,391	0,07498	151,91	0,000
Duree	0,494	0,247	0,07498	3,29	0,081
SO3	-3,931	-1,966	0,07498	-26,21	0,001
Temperature	0,814	0,407	0,07498	5,43	0,032
Elimination	1,761	0,881	0,07498	11,74	0,007
Acide	-0,994	-0,497	0,07498	-6,63	0,022
Ac/T+X	-0,324	-0,162	0,07498	-2,16	0,164
Duree*SO3	-0,809	-0,404	0,07498	-5,39	0,033
Duree*Temperature	0,931	0,466	0,07498	6,21	0,025
Duree*Elimination	-0,901	-0,451	0,07498	-6,01	0,027
Duree*Acide	0,369	0,184	0,07498	2,46	0,133
Duree*Ac/T+X	-0,231	-0,116	0,07498	-1,54	0,263
SO3*Temperature	-0,514	-0,257	0,07498	-3,43	0,076
SO3*Ac/T+X	-0,006	-0,003	0,07498	-0,04	0,971

S = 0,299927 SomCar-ErrPrév = 11,5344
R carré = 99,81 % R carré (prév) = 87,67 % R carré (ajust) = 98,56

Figure 50 – L'analyse statistique s'affiche dans la fenêtre Session.

On peut obtenir une représentation graphique de ces résultats et se rendre compte de l'influence des facteurs sur la réponse en appelant le graphique des effets comme il est expliqué à l'exemple 02_bijoux.

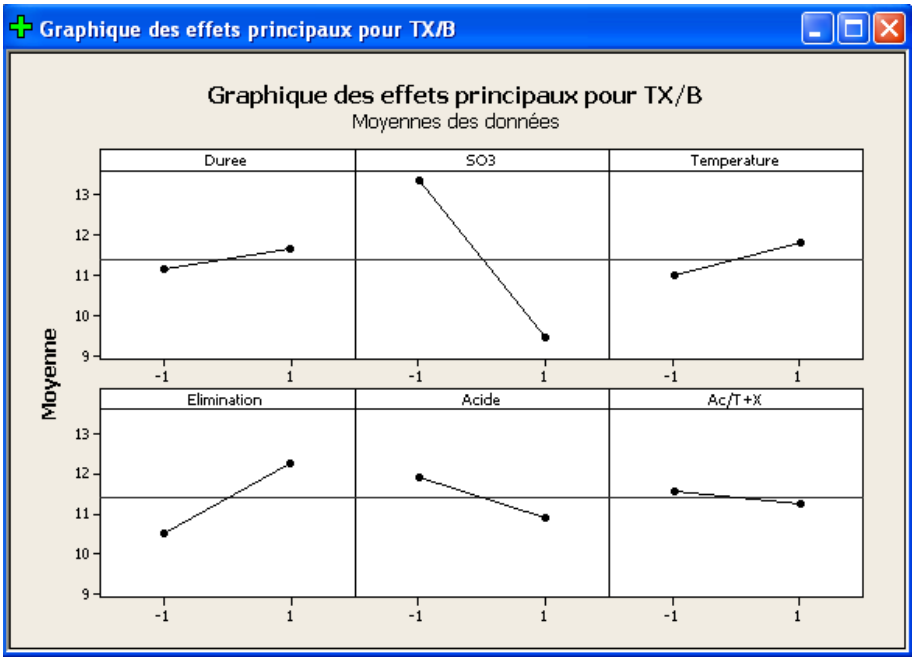


Figure 51 – Diagramme des effets.

6.4 INTERPRETATION DE L'ANALYSE DU PLAN ET CONCLUSION

On cherche à maximiser la réponse, il faut donc régler le facteur le plus influent, "SO3 dans l'acide sulfurique", au niveau -1, c'est-à-dire à 0% de SO3. Mais pour un réglage précis il faut tenir compte des interactions. On utilise donc l'optimiseur de Minitab.

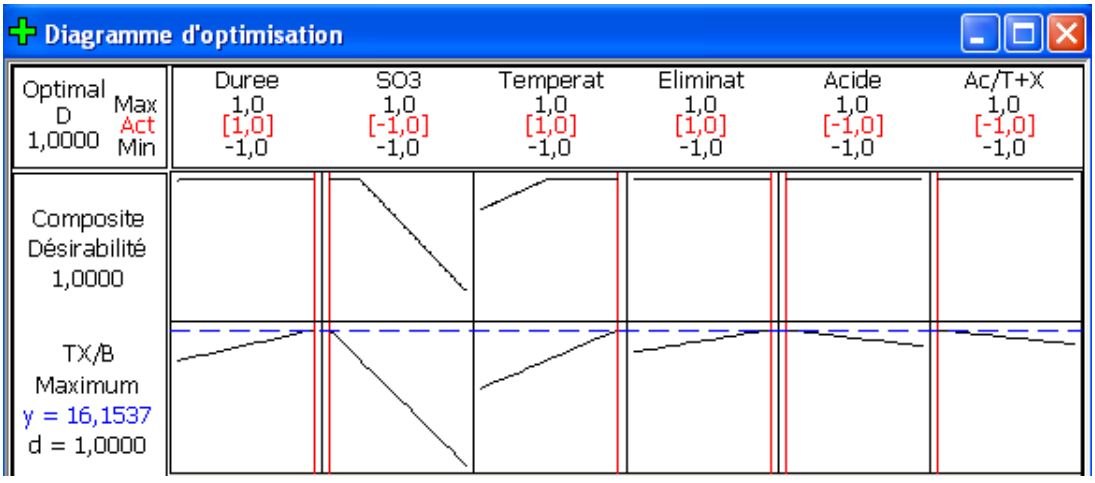


Figure 52 – Optimiseur de Minitab.

La réponse sera optimisée si

- La Durée de la réaction (1) est au niveau haut, soit 9 heures
- Le SO_3 dans SO_4H_2 (2) est au niveau bas, soit 0%
- La Température de la réaction (3) est au niveau haut, soit 110°C
- L'Élimination de l'eau (4) est au niveau haut, soit avec élimination de l'eau.

- La Durée de l'addition d'acide (5) est au niveau bas, soit 10 min
- Le Rapport acide/ toluène +xylènes (6) est au niveau bas, soit 0,8

****

7. EXEMPLE 12_ RECTIFICATION

7.1 PRESENTATION DE L'EXEMPLE

Cet exemple est tiré du livre "Introduction aux Plans d'expériences" Quatrième édition paru chez Dunod Paris (page 184). Le lecteur trouvera, dans cet ouvrage, les détails de préparation du plan (description détaillée de l'étude, définition de l'objectif à atteindre, choix des réponses à mesurer, sélection des facteurs qui peuvent être influents sur la réponse, définition du domaine d'étude, recherche des contraintes et des difficultés possibles, etc.)

Pour ce manuel consacré à l'utilisation de Minitab nous ne décrirons pas cette préparation du plan. Sachez seulement que l'objectif du contremaitre qui mène l'étude est de régler une machine-outil pour que l'état de surface des pièces usinées soit le plus proche possible de la perfection.

Réponses

La première réponse est la rugosité de l'état de surface.

La seconde réponse est le nombre de pics par unité de longueur à la surface du métal.

Objectif

On veut la valeur la plus faible possible pour la rugosité, soit, une valeur inférieure à 0,150. L'écart-type de cette mesure est de 0,002 unité.

On vise un nombre de pics inférieur à 50 par unité de longueur. L'écart-type de cette mesure est de 2 unités.

Facteurs

Le contremaitre pense qu'il y a deux facteurs pouvant être influents :

- La vitesse d'avancement (1) de l'outil en mètres par minute.
- La vitesse de coupe (2) de l'outil en mètres par seconde.

Tableau 5 : Domaine d'étude de l'exemple 12_ rectification.

Facteur	Niveau – 1,21	Niveau – 1	Niveau 0	Niveau + 1	Niveau + 1,21
Vitesse d'avancement (1)	0,74	0,9	1,65	2,4	2,56
Vitesse de coupe (2)	13,95	15	20	25	26,05

Choix du plan expérimental

Le contremaître commence par un plan factoriel classique mais il soupçonne qu'il sera obligé de poursuivre l'étude par un plan pour surfaces de réponse. Il prévoit

donc deux points de contrôle au centre du domaine d'étude et choisit un domaine d'étude initial tel qu'il puisse ensuite l'augmenter pour exécuter les points en étoile d'un plan composite.

7.2 CONSTRUCTION DU PLAN FACTORIEL

La construction d'un plan complet à deux facteurs s'effectue comme d'habitude mais en n'oubliant pas de mettre deux points au centre (Figure 53).

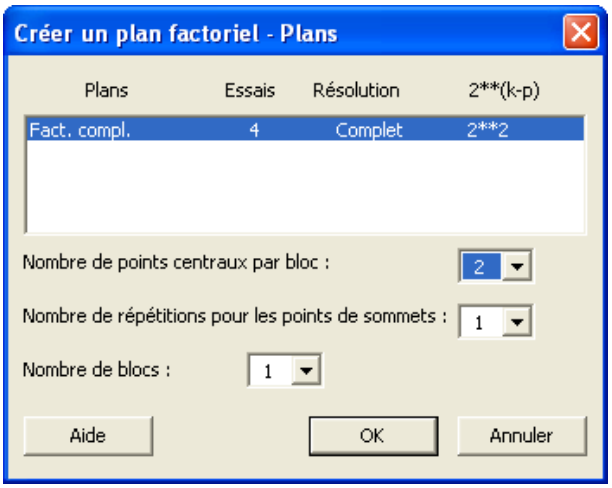


Figure 53 – Choix du plan factoriel.

7.3 ANALYSE DU PLAN FACTORIEL

Lorsque les essais sont terminés, vous entrez les réponses dans la feuille de travail. Les valeurs de la rugosité ont été multipliées par 1 000 pour éviter un grand nombre de décimales et faciliter la lisibilité. Cela ne change en rien les conclusions de l'étude.

12_Rectification_factoriel.MTW ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	OrdreStd	OrdEssai	PtCentr	Blocs	A	B	Rugo	Pics	
1	1	1	1	1	-1	-1	194	77,8	
2	2	2	1	1	1	-1	282	68,4	
3	3	3	1	1	-1	1	120	65,3	
4	4	4	1	1	1	1	91	96,1	
5	5	5	0	1	0	0	233	63,8	
6	6	6	0	1	0	0	235	61,9	
7									

Figure 54 – Feuille de travail Minitab avec le plan (unités codées) et les réponses.

Puis vous lancez l'analyse statistique pour les deux réponses. Les résultats figurent dans la fenêtre session.

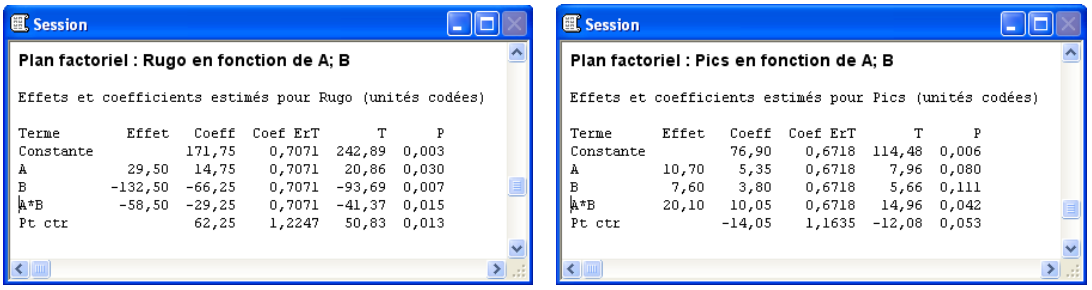

Session
Plan factoriel : Rugo en fonction de A; B
Effets et coefficients estimés pour Rugo (unités codées)
Terme Effet Coeff Coef ErT T P
Constante 171,75 0,7071 242,89 0,003
A 29,50 14,75 0,7071 20,86 0,030
B -132,50 -66,25 0,7071 -93,69 0,007
A*B -58,50 -29,25 0,7071 -41,37 0,015
Pt ctr 62,25 1,2247 50,83 0,013
Session
Plan factoriel : Pics en fonction de A; B
Effets et coefficients estimés pour Pics (unités codées)
Terme Effet Coeff Coef ErT T P
Constante 76,90 0,6718 114,48 0,006
A 10,70 5,35 0,6718 7,96 0,080
B 7,60 3,80 0,6718 5,66 0,111
A*B 20,10 10,05 0,6718 14,96 0,042
Pt ctr -14,05 1,1635 -12,08 0,053

Figure 55 – Résultats de l'analyse statistique.

Peut-on arrêter les essais après ce plan. Pour le savoir il faut s'assurer que le modèle mathématique utilisé est bon. On vérifie cette hypothèse en comparant la valeur calculée de la réponse au point central, a_0, à la valeur mesurée, y_0, en ce même point. Ici, on observe que pour la rugosité (valeurs multipliées par 1000) :

$$\text{Valeur calculée : } a_0 = 171{,}75 \pm 3\frac{2}{\sqrt{4}} = 171{,}75 \pm 3$$

$$\text{Valeur mesurée : } y_0 = \frac{233+235}{2} = 234 \pm 3\frac{2}{\sqrt{2}} = 234 \pm 4{,}24$$

Le logiciel indique la différence entre ces deux valeurs :

$$y_0 - a_0 = 234 - 171{,}75 = 62{,}25$$

Ces deux valeurs ne peuvent pas être considérées comme égales. Le modèle polynomial du premier degré est donc insuffisant pour expliquer les résultats expérimentaux. Il faut passer à un modèle du second degré et pour cela il faut ajouter des points expérimentaux.

7.4 CONSTRUCTION DU PLAN POUR SURFACE DE REPONSE

On accède aux plans pour surfaces de réponse de la manière suivante :

☞ Cliquez sur Stat du menu principal. Un menu déroulant apparaît dans lequel figure DOE (Plan d'expériences).

☞ Cliquez sur DOE (Plan d'expériences). Un nouveau menu apparaît (Figure 3) dans lequel il y a quatre choix.

☞ Cliquez sur la rubrique Surface de réponse. Apparaît un nouveau menu qui vous permet de créer un plan pour surface de réponse (Figure 56).

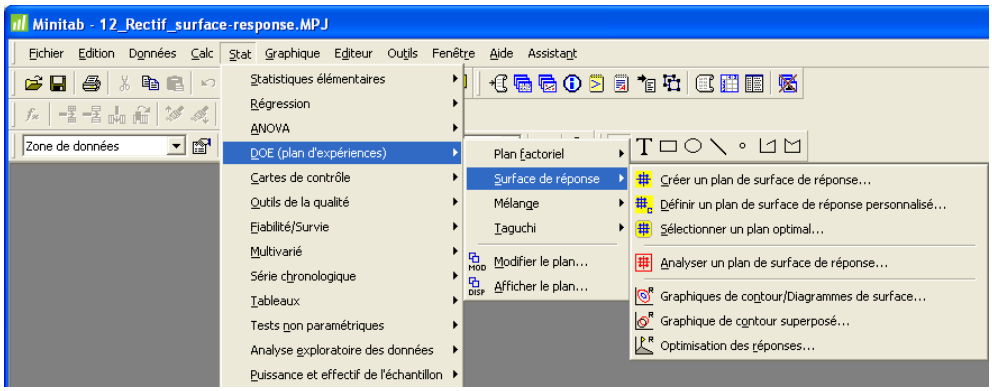


Figure 56 – Menu permettant de créer un plan pour surface de réponse.

☞ Cliquez sur Créer un plan pour surface de réponse. Apparaît une nouvelle fenêtre qui vous permet de préciser le plan pour surface de réponses (Figure 57). Vous choisissez un plan central composite à deux facteurs.

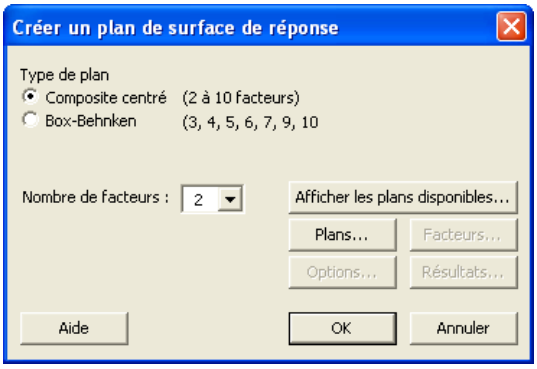


Figure 57 – Menu permettant de créer un plan pour surface de réponse.

☞ Cliquez sur le bouton Plans. Vous obtenez une nouvelle fenêtre dans laquelle vous pouvez définir le nombre de points au centre. Vous ajoutez deux nouveaux points centraux pour vous assurer qu'il n'y pas de dérive entre les deux campagnes d'expérimentation, soit 4 points centraux en tout. Vous mettez donc cette valeur en face de Personnalisé Bloc de cube (Figure 58). En fonction du plan factoriel et du nombre de points au centre, vous savez que le plan est optimal si alpha est égal à 1,21. Vous mettez donc cette valeur en face de Personnaliser (Figure 58).

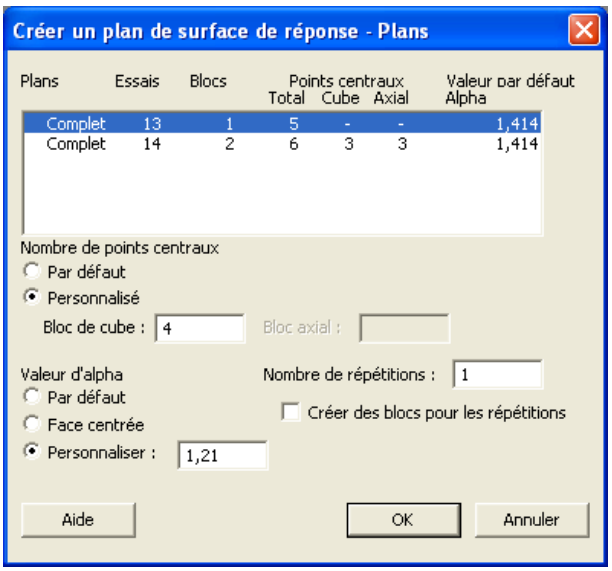

Créer un plan de surface de réponse - Plans
Plans Essais Blocs Points centraux Total Cube Axial Valeur par défaut Alpha
Complet 13 1 5 - - 1,414
Complet 14 2 6 3 3 1,414
Nombre de points centraux
Par défaut
Personnalisé
Bloc de cube : 4
Bloc axial :
Valeur d'alpha
Par défaut
Face centrée
Personnaliser : 1,21
Nombre de répétitions : 1
Créer des blocs pour les répétitions
Aide
OK
Annuler

Figure 58 – Menu permettant de préciser les caractéristiques du plan pour surfaces de réponse.

☞ Cliquez sur le bouton OK. Vous revenez à la fenêtre de la Figure 57.
☞ Dans les options, décochez la randomisation.
☞ Cliquez sur le bouton OK de la Figure 57. Vous obtenez le plan souhaité (Figure 59)

Feuille de travail 9 ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	OrdreStd	OrdEssai	TypePt	Blocs	A	B	
2	2	2	1	1	1,00	-1,00	
3	3	3	1	1	-1,00	1,00	
4	4	4	1	1	1,00	1,00	
5	5	5	-1	1	-1,21	0,00	
6	6	6	-1	1	1,21	0,00	
7	7	7	-1	1	0,00	-1,21	
8	8	8	-1	1	0,00	1,21	
9	9	9	0	1	0,00	0,00	
10	10	10	0	1	0,00	0,00	
11	11	11	0	1	0,00	0,00	
12	12	12	0	1	0,00	0,00	

Figure 59 – Feuille de travail Minitab avec le plan (unités codées) pour surfaces de réponse (colonnes A et B).

7.5 ANALYSE DU PLAN POUR SURFACE DE REPONSE

Vous mettez les réponses déjà connues dans la feuille de travail et vous réalisez les essais correspondant aux points en étoile et aux deux nouveaux points au centre. Vous entrez ces nouveaux résultats dans la feuille de travail précédente en ajoutant le nom des facteurs et des réponses.

12_Rectificationsurface_de_reponse.MTW ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	OrdreStd	OrdEssai	Blocs	TypePt	Avance	Coupe	Rugo	Pics	
1	1	1	1	1	-1,00	-1,00	194	77,8	
2	2	2	1	1	1,00	-1,00	282	68,4	
3	3	3	1	1	-1,00	1,00	120	65,3	
4	4	4	1	1	1,00	1,00	91	96,1	
5	5	5	1	-1	-1,21	0,00	154	52,3	
6	6	6	1	-1	1,21	0,00	195	60,4	
7	7	7	1	-1	0,00	-1,21	278	87,0	
8	8	8	1	-1	0,00	1,21	122	95,7	
9	9	9	1	0	0,00	0,00	232	61,5	
10	10	10	1	0	0,00	0,00	230	60,5	
11	11	11	1	0	0,00	0,00	233	63,8	
12	12	12	1	0	0,00	0,00	235	61,9	
13									

Figure 60 – Feuille de travail Minitab avec le plan (unités codées) pour surfaces de réponse et les réponses.

Pour faire l'analyse statistique:

☞ Cliquez sur Stat du menu principal et choisissez DOE (Plan d'expériences)/ Surface de réponse/Analyser un plan de surface de réponse (Figure 56).

☞ Dans la fenêtre Analyser un plan de surface de réponse qui apparaît vous entrez les deux réponses (Figure 61).

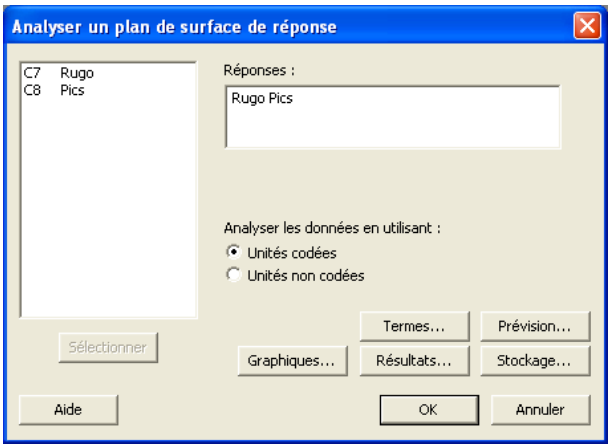


Figure 61 – Fenêtre Analyser un plan de surface de réponse permettant de définir les analyses souhaitées.

☞ Puis, vous cliquez sur le bouton Termes. Le logiciel propose un modèle quadratique, vous acceptez en cliquant sur le bouton OK (Figure 62). Vous revenez à la Figure 61.

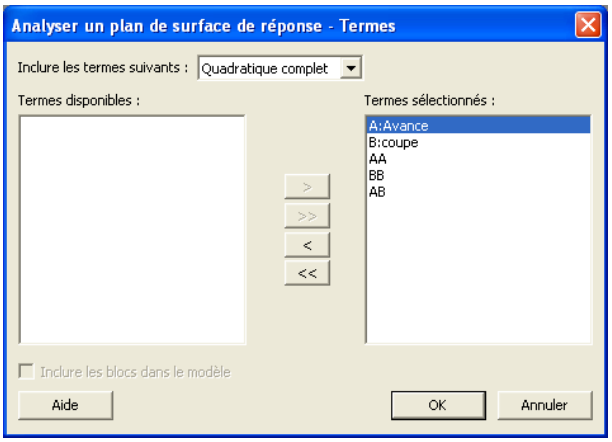
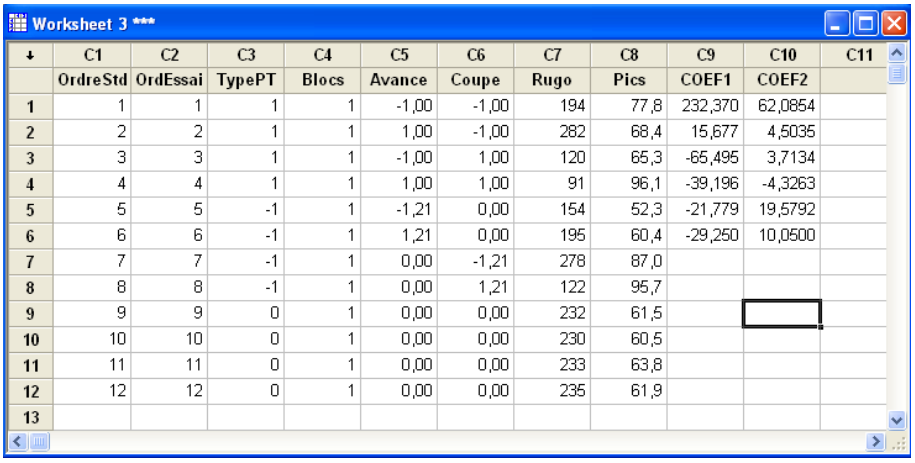


Figure 62 – Fenêtre Analyser un plan de surface de réponse-Termes permettant de définir le modèle mathématique.

☞ Vous donnez vos instructions de sorties en utilisant les autres boutons de la Figure 61 et vous terminez en cliquant sur le bouton OK.

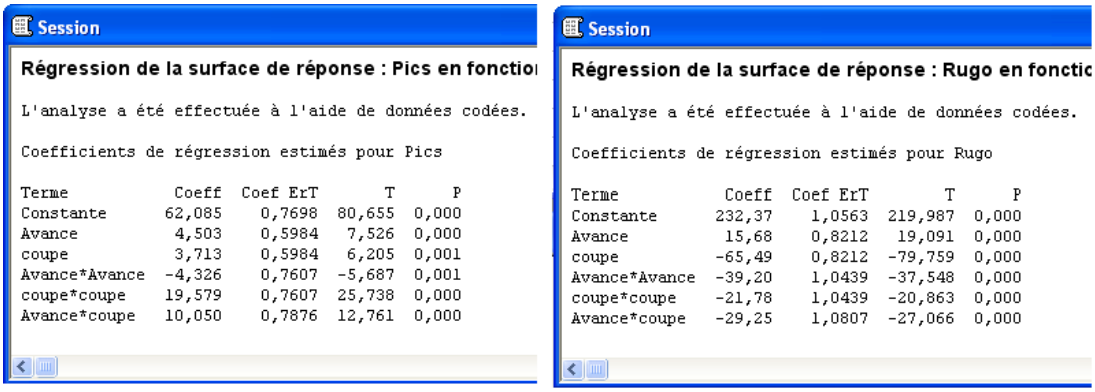
Les coefficients du modèle quadratique s'affichent dans la feuille de travail et les résultats statistiques dans la fenêtre Session.



Worksheet 3 ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
	OrdreStd	OrdEssai	TypePT	Blocs	Avance	Coupe	Rugo	Pics	COEF1	COEF2	
1	1	1	1	1	-1,00	-1,00	194	77,8	232,370	62,0854	
2	2	2	1	1	1,00	-1,00	282	68,4	15,677	4,5035	
3	3	3	1	1	-1,00	1,00	120	65,3	-65,495	3,7134	
4	4	4	1	1	1,00	1,00	91	96,1	-39,196	-4,3263	
5	5	5	-1	1	-1,21	0,00	154	52,3	-21,779	19,5792	
6	6	6	-1	1	1,21	0,00	195	60,4	-29,250	10,0500	
7	7	7	-1	1	0,00	-1,21	278	87,0			
8	8	8	-1	1	0,00	1,21	122	95,7			
9	9	9	0	1	0,00	0,00	232	61,5			
10	10	10	0	1	0,00	0,00	230	60,5			
11	11	11	0	1	0,00	0,00	233	63,8			
12	12	12	0	1	0,00	0,00	235	61,9			
13											

Figure 63 – Feuille de travail Minitab avec le plan (unités codées) pour surfaces de réponse, les réponses et les coefficients du modèle quadratique.



Session

Régression de la surface de réponse : Pics en fonctio

L'analyse a été effectuée à l'aide de données codées.

Coefficients de régression estimés pour Pics

Terme	Coeff	Coef ErT	T	P
Constante	62,085	0,7698	80,655	0,000
Avance	4,503	0,5984	7,526	0,000
coupe	3,713	0,5984	6,205	0,001
Avance*Avance	-4,326	0,7607	-5,687	0,001
coupe*coupe	19,579	0,7607	25,738	0,000
Avance*coupe	10,050	0,7876	12,761	0,000

Session

Régression de la surface de réponse : Rugo en fonctic

L'analyse a été effectuée à l'aide de données codées.

Coefficients de régression estimés pour Rugo

Terme	Coeff	Coef ErT	T	P
Constante	232,37	1,0563	219,987	0,000
Avance	15,68	0,8212	19,091	0,000
coupe	-65,49	0,8212	-79,759	0,000
Avance*Avance	-39,20	1,0439	-37,548	0,000
coupe*coupe	-21,78	1,0439	-20,863	0,000
Avance*coupe	-29,25	1,0807	-27,066	0,000

Figure 64 – Résultats de l'analyse statistique.

7.6 INTERPRETATION DE L'ANALYSE DU PLAN

Pour interpréter les résultats précédents, le plus simple est de tracer les graphiques d'isoréponses des deux réponses. On détermine ainsi les endroits du domaine où les objectifs sont ou ne sont pas atteints.

☞ Cliquez sur Stat du menu principal et choisissez DOE (Plan d'expériences) / Surface de réponse / Graphiques de contour / Diagrammes de surface (Figure 56).

☞ Dans la fenêtre Graphiques de contour/Diagrammes de surface qui apparaît, vous cochez Graphique de contour et vous cliquez sur le bouton Configuration (Figure 65). Vous obtenez la fenêtre Graphiques de contour/Diagrammes de surface-Contour (Figure 66)

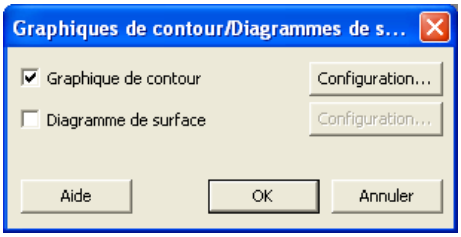


Figure 65 – Fenêtre Graphique de contour/Diagramme de surface.

☞ Dans la fenêtre Graphiques de contour/Diagrammes de surface-Contour vous choisissez la réponse à illustrer et vous attribuez les axes du graphique aux facteurs qui vous intéressent. Pour préciser les caractéristiques du graphique vous utilisez les boutons Contours, Configuration et Options.

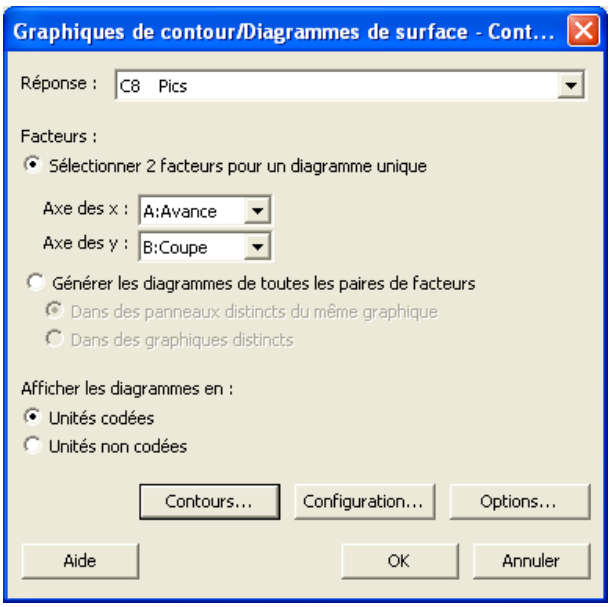


Figure 66 – Fenêtre Graphiques de contour/Diagrammes de surface-Contour.

Le bouton Contours donne accès à une fenêtre (Figure 67) vous permettant d'indiquer le nombre de courbes isoréponses et les propriétés du graphique : surface, lignes indication des points d'expériences.

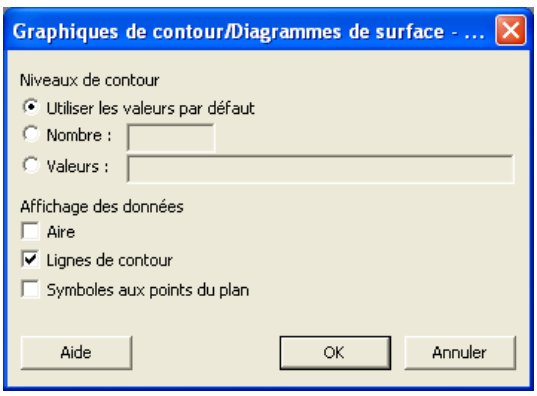


Figure 67 – Fenêtre permettant de préciser la nature du graphique d'isoréponses.

Le bouton Configuration donne accès à une fenêtre vous permettant de choisir les niveaux des facteurs qui ne sont pas illustrés par le graphique. On verra une application de ce bouton à l'exemple suivant (13_Yoghourt).

Le bouton Options donne accès à une fenêtre vous permettant de donner un titre au graphique.

Quand les caractéristiques du graphique sont définies, on clique sur le bouton OK de la Figure 65. On obtient le graphique correspondant à la réponse choisie.

Le premier objectif est d'obtenir une surface usinée ayant le plus petit nombre de pics et si possible moins de 50. Le graphique de la Figure 68 montre que cet objectif est presque atteint lorsque la vitesse de coupe est proche du niveau 0,3 et la vitesse d'avance est au niveau -1,21.

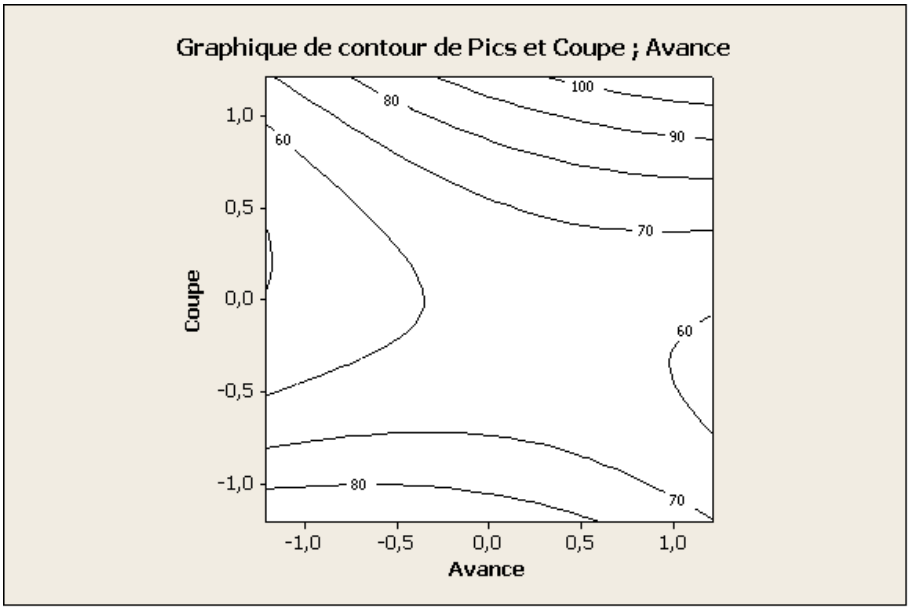


Figure 68 – Courbes isoréponses du nombre de pics en fonction de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance.

Le second objectif est d'obtenir une surface usinée ayant une rugosité inférieure à 150. Le graphique de la Figure 69 montre que cet objectif est atteint lorsque la vitesse de coupe est supérieure au niveau 0,2 et la vitesse d'avance réglée à environ -1,2. Le meilleur compromis semble donc être :

- Vitesse d'avance niveau -1,2 soit 0,75 mètre par minute.
- Vitesse de coupe niveau 0,1 à 0,4, soit d'environ 20 à 25 mètres par seconde.

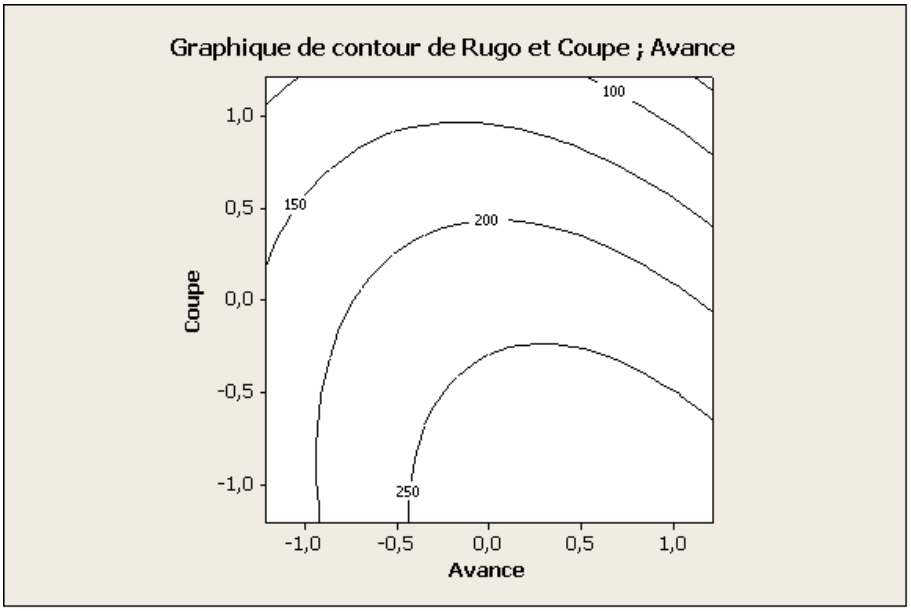


Figure 69 – Courbes isoréponses de la rugosité(valeur multipliée par 1000) en fonction de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance.

Pour être sûr de ces résultats le contremaitre fait exécuter plusieurs tests de confirmation. A la fin de ces essais, il décide de choisir un réglage qu'il impose à tout son atelier s et dont il entend qu'on le suive avec rigueur :

- Vitesse d'avance : 0,75 mètre par minute.
- Vitesse de coupe : 21 mètres par seconde.

Depuis plus aucune réclamation n'a été constatée en clientèle.

****

8. EXEMPLE 13_YOGHOURT

8.1 PRESENTATION DE L'EXEMPLE

Cet exemple est tiré du livre "Introduction aux Plans d'expériences" Quatrième édition paru chez Dunod Paris (page 194). Le lecteur y trouvera les détails de préparation du plan (description détaillée de l'étude, définition de l'objectif à atteindre, choix les réponses à mesurer, sélection des facteurs qui peuvent être influents sur la réponse, définition du domaine d'étude, recherche des contraintes et des difficultés possibles, etc.)

Pour ce manuel consacré à l'utilisation de Minitab nous ne décrirons pas cette préparation du plan. Sachez seulement que la mise au point d'un procédé particulier d'élaboration de yoghourts doux nécessite l'étude de trois facteurs. On sait que le modèle est probablement du second degré. Le responsable de l'étude décide de réaliser directement un plan de Box-Behnken.

Réponses

Le lait servant à fabriquer les yoghourts doux doit être appauvri en lactose qui est la cause de l'acidité. Moins il y aura de lactose, plus les yoghourts seront doux. La réponse choisie est donc l'appauvrissement du lait en lactose.

Objectif

L'objectif est d'obtenir le lait avec le plus fort appauvrissement en lactose. Une valeur supérieure à 48 serait excellente.

Facteurs

Les expérimentateurs retiennent trois facteurs :

- ♦ Le taux de dilution du lait.
- ♦ Le pH lié à l'injection de stabilisant.
- ♦ Le taux de concentration du lait.

Domaine d'étude

Les niveaux hauts et bas de chaque facteur sont définis comme l'indique le Tableau 6.

Tableau 6 : Domaine d'étude de l'exemple 13_Yoghourt.

Facteur	Niveau – 1	Niveau + 1
Dilution (1)	0,5	2
pH (2)	6	5
Concentration (3)	1,5	2,5

Choix du plan expérimental

Les expérimentateurs décident de réaliser directement un plan pour surfaces de réponse. Ils choisissent un plan de Box-Behnken.

8.2 CONSTRUCTION DU PLAN DE BOX-BEHNKEN

On accède aux plans de Box-Behnken de la même manière que pour les plans pour surface de réponse :

☞ Cliquez sur Stat du menu principal. Un menu déroulant apparaît dans lequel figure DOE (Plan d'expériences).

☞ Cliquez sur DOE (Plan d'expériences). Un menu déroulant apparaît dans lequel figure Surface de réponse.

☞ Cliquez sur la rubrique Surface de réponse. Apparaît un nouveau menu qui vous permet de créer un plan pour surface de réponse (Figure 56).

Cochez Box-Behnken dans la fenêtre Créer un plan de surface de réponse (Figure 70).

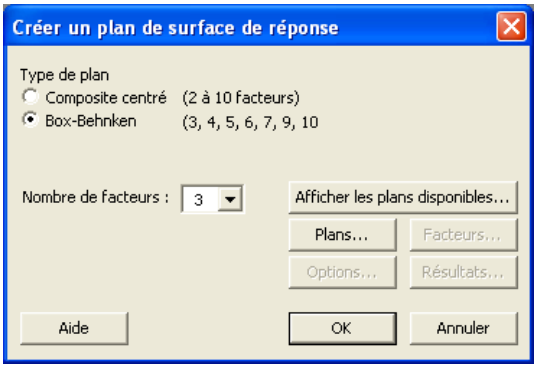


Figure 70 – Menu permettant de créer un plan de Box-Behnken.

Le logiciel donne le plan souhaité (Figure 71).

Feuille de travail 3 ***

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	OrdreStd	OrdEssai	TypePt	Blocs	A	B	C	
1	1	1	2	1	-1	-1	0	
2	2	2	2	1	1	-1	0	
3	3	3	2	1	-1	1	0	
4	4	4	2	1	1	1	0	
5	5	5	2	1	-1	0	-1	
6	6	6	2	1	1	0	-1	
7	7	7	2	1	-1	0	1	
8	8	8	2	1	1	0	1	
9	9	9	2	1	0	-1	-1	
10	10	10	2	1	0	1	-1	
11	11	11	2	1	0	-1	1	
12	12	12	2	1	0	1	1	
13	13	13	0	1	0	0	0	
14	14	14	0	1	0	0	0	
15	15	15	0	1	0	0	0	
16								

Figure 71 – Feuille de travail Minitab avec le plan (unités codées) de Box-Behnken.

8.3 Analyse du plan de Box-Behnken

Lorsque les essais sont terminés, vous inscrivez les réponses dans la feuille de travail (Figure 72) et vous réalisez les calculs comme pour l'exemple précédents.

13_Yoghourt.MTW ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C
	OrdreStd	OrdEssai	TypePt	Blocs	Dilution (1)	pH (2)	Concentration (3)	Appauvrissement	
1	1	1	2	1	-1	-1	0	51,3	
2	2	2	2	1	1	-1	0	42,6	
3	3	3	2	1	-1	1	0	42,2	
4	4	4	2	1	1	1	0	50,4	
5	5	5	2	1	-1	0	-1	40,7	
6	6	6	2	1	1	0	-1	41,3	
7	7	7	2	1	-1	0	1	41,5	
8	8	8	2	1	1	0	1	40,8	
9	9	9	2	1	0	-1	-1	39,5	
10	10	10	2	1	0	1	-1	35,3	
11	11	11	2	1	0	-1	1	35,2	
12	12	12	2	1	0	1	1	39,8	
13	13	13	0	1	0	0	0	50,8	
14	14	14	0	1	0	0	0	50,1	
15	15	15	0	1	0	0	0	49,4	
16									

Figure 72 – Feuille de travail Minitab avec le plan de Box-Behnken et les réponses.

Pour faire l'analyse statistique:

☞ Cliquez sur Stat du menu principal et choisissez DOE (Plan d'expériences)/ Surface de réponse/Analyser un plan de surface de réponse (Figure 56).

☞ Dans la fenêtre Analyser un plan de surface de réponse qui apparaît la réponse "Appauvrissement" est déjà rentrée. Vous vérifiez que le modèle est bien un modèle quadratique et vous cliquez sur le bouton OK. L'analyse statistique apparaît dans la fenêtre Session (Figure 73).

Session

Résultats pour : 13_Yoghourt.MTW

Régression de la surface de réponse : Appauvrissem en fonction de Dilution (1

L'analyse a été effectuée à l'aide de données codées.

Coefficients de régression estimés pour Appauvrissement

Terme	Coeff	Coef ErT	T	P
Constante	50,1000	0,3014	166,232	0,000
Dilution (1)	-0,0750	0,1846	-0,406	0,701
pH (2)	-0,1125	0,1846	-0,610	0,569
Concentration (3)	0,0625	0,1846	0,339	0,749
Dilution (1)*Dilution (1)	0,0750	0,2717	0,276	0,794
pH (2)*pH (2)	-3,5500	0,2717	-13,068	0,000
Concentration (3)*Concentration (3)	-9,1000	0,2717	-33,497	0,000
Dilution (1)*pH (2)	4,2250	0,2610	16,187	0,000
Dilution (1)*Concentration (3)	-0,3250	0,2610	-1,245	0,268
pH (2)*Concentration (3)	2,2000	0,2610	8,429	0,000

Figure 73 – Feuille Session donnant les coefficients du modèle quadratique.

8.4 INTERPRETATION DE L'ANALYSE DU PLAN

Le modèle mathématique indique que l'on a un appauvrissement de 50,1 au point stationnaire de la conique. L'objectif de 48 sera donc atteint et même dépassé. D'un point de vue économique on a intérêt à choisir une faible dilution. Pour cette raison on choisit une dilution de niveau -1 (soit 0,5). Pour choisir les niveaux des

deux autres facteurs traçons le graphique des isoréponses en fonction du pH et de la concentration.

☞ Cliquez sur Stat du menu principal et choisissez DOE (Plan d'expériences)/ Surface de réponse/Graphiques de contour/Diagrammes de surface (Figure 56).

Vous obtenez la fenêtre de la Figure 74.

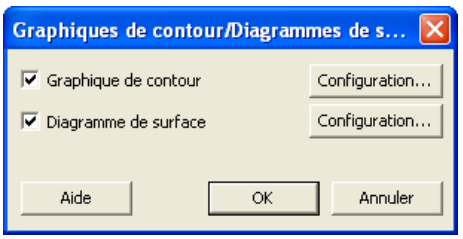


Figure 74 – Fenêtre Graphiques de contour/Diagrammes de surface donnant accès aux graphiques isoréponses et aux graphiques en surface de réponse.

☞ Cliquez sur le bouton Configuration pour obtenir la fenêtre de définition des graphiques (Figure 75).

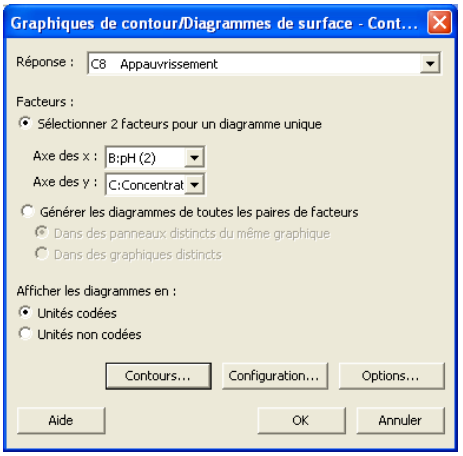


Figure 75 – Choix de la réponse et des facteurs à illustrer par le graphique.

☞ Cliquez sur le bouton Configuration de la fenêtre de la Figure 75. La fenêtre Graphiques de contour/Diagrammes de surface-Contour-Configuration apparaît (Figure 76). Vous indiquez que la dilution est fixée au niveau -1.

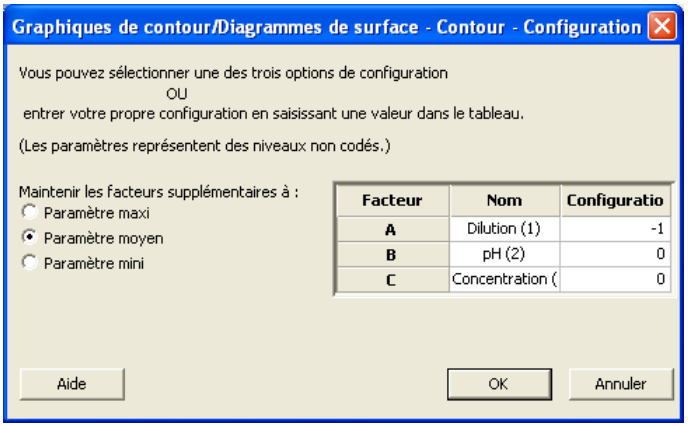


Figure 76 – On impose un niveau aux facteurs qui ne sont pas illustrés sur le graphique.

Lorsque ces préparations sont terminées, vous cliquez sur les boutons OK et vous obtenez les graphiques cherchés.

Vous obtenez ainsi le graphique des isoréponses de l'appauvrissement en fonction de la concentration et du pH pour une dilution de 0,5 (Figure 77).

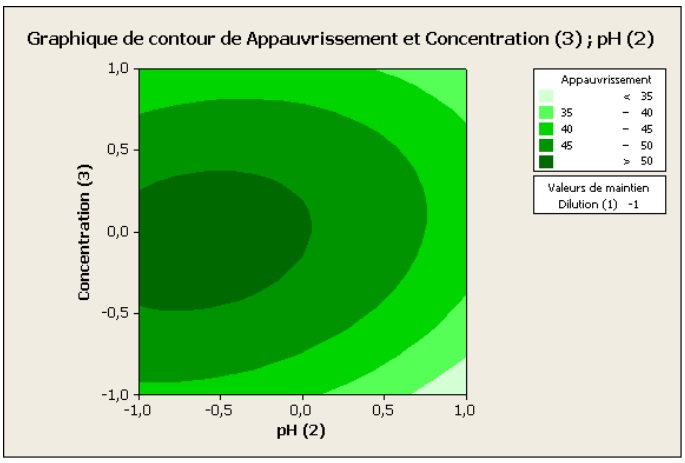


Figure 77 – Appauvrissement en fonction de la concentration et du pH pour une dilution de 0,5 (niveau -1).

Ce graphique montre que la zone des appauvrissements supérieurs à 48 se situe aux alentours du niveau -0,5 pour le pH (5,8 en unités naturelles) et du niveau zéro (2 en unités naturelles) pour la concentration.

Le graphique de la surface de réponse montre qu'il s'agit d'un sommet. On aura donc un réglage stable si l'on choisit ce point de fonctionnement.

On effectue les essais de validation qui confirment les résultats du plan et de son interprétation.

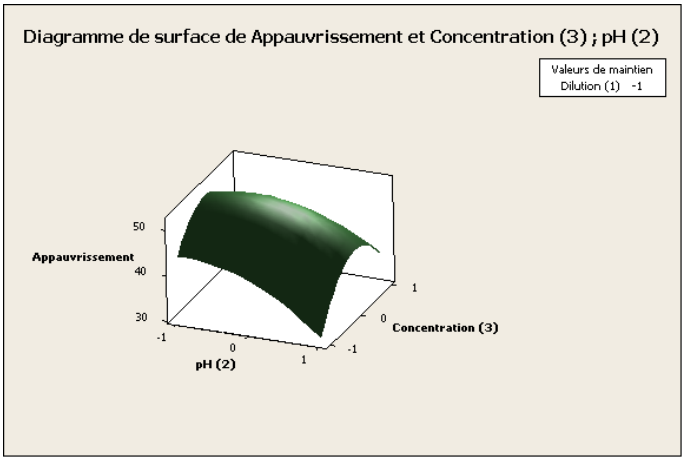


Figure 78 – Surface de réponse illustrant l'appauvrissement en fonction de la concentration et du pH pour une dilution de 0,5.

On effectue les essais de validation qui confirment les résultats du plan et de son analyse. On peut donc maintenant recommander les conditions de fonctionnement suivantes :

- ♦ Dilution (1) 0,5
- ♦ pH (2) 5,8
- ♦ Concentration (3) : 2

****

Bibliographie

1. "**Introduction aux Plans d'expériences**"
   Jacques GOUPY et Lee CREIGHTON
   Dunod. Paris. Quatrième édition 293 pages. (2009).
   ISBN 2 10 049744 8

2. "**Plans d'expériences pour surfaces de réponse**"
   Jacques GOUPY
   Dunod. Paris. 409 pages. (1999).
   ISBN 2 10 003993 8

3. "**Plans d'expériences : les mélanges**"
   Jacques GOUPY
   Dunod. Paris. 285 pages. (2000).
   ISBN 2 10 004218 1

4. "**Pratiquer les Plans d'Expériences**"
   Jacques GOUPY
   Dunod. Paris. 560 pages. (2005).
   ISBN 2 10 004217 3

5. "I**ntroduction to Design of Experiments**"
   Jacques GOUPY et Lee CREIGHTON
   SAS Press-Cary (USA). Third edition.448 pages. (2007).
   ISBN 978 1 59994 422 7

Sites Internet

Vous pouvez télécharger les fichiers Minitab de ce manuel et du livre "Introduction aux plans d'expériences" sur les deux sites suivants :

http://www.plansdexperiences.com

http://www.chimiometrie.org

Site Minitab

http://www.minitab.com

Site Dunod

http://www.dunod.com